

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh otopné soustavy rodinného domu s aplikací vysokoteplotního  
palivového článku

Heating System for Family House with High Temperature Fuel Cell

Student:

Dudok Tomáš

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

Ostrava 2010

## Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Dudok**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí  
Téma: **Návrh otopné soustavy rodinného domu s aplikací vysokoteplotního palivového článku**  
**Heating System for Family House with High Temperature Fuel Cell**

### Zásady pro vypracování:

Navrhnete otopnou soustavu pro zadanou novostavbu rodinného domu, kogeneračním zdrojem tepla a elektrické energie bude vysokoteplotní palivový článek. Návrh otopné soustavy bude proveden na základě výpočtu tepelných ztrát budovy dle ČSN 060210 a s ohledem na systém přípravy teplé užitkové vody.

### Práce bude obsahovat:

Rešeršní část týkající se technologie palivových článků, s důrazem na technologii palivových článků vysokoteplotních.

Rešeršní část týkající se řešení otopných soustav pro rodinné domy. Energetickou bilanci dané stavby, výpočet tepelných ztrát dle ČSN 060210, výpočet potřeby tepla pro TUV.

Návrh otopné soustavy s ohledem na začlenění a provoz vysokoteplotního palivového článku jako kogeneračního zdroje energie.

### Seznam doporučené odborné literatury:

[1] PETRÁŠ, Da kol.. *Vytápění rodinných a bytových domů*, Jaga group, s.r.o., Bratislava 2005, ISBN 80-8076-020-9

[2] LARMINIE, J., DICKS, A. *Fuel Cell Systems Explained*, Second Edition, John Wiley and Sons Inc., Chichester, 2003, ISBN 0-470-84857-X.

[3] O'HAYRE, R., SUK-WON CHA, COLELLA, W., FRITZ, B. PRINZ. *Fuel Cell Fundamentals*, John Wiley and Sons Inc., New York 2006, ISBN 0-471-74148-5

[4] SZELIGA, Z. *Základy technologie palivových článků*, Ostrava 2008, ISBN 978-80-248-1671-5

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



---

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
*děkan fakulty*

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21. 5. 2010

*Tomáš Dudok*

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21. 5. 2010

*Tomáš Dudok*

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Tomáš Dudok

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Pekařská 1471/116, 747 05 Opava

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

DUDOK, T. *Návrh otopné soustavy rodinného domu s aplikací vysokoteplotního palivového článku : bakalářská práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, xxx s. Vedoucí práce: Szeliga, Z.

Bakalářská práce se zabývá návrhem otopné soustavy pro rodinný dům. Kogeneračním zdrojem tepla a elektrické energie bude vysokoteplotní palivový článek. V úvodu je vysvětlen princip, funkce a rozdělení palivových článků se zaměřením na vysokoteplotní palivové články. Na základě zvoleného palivového článku a výpočtu tepelných ztrát budovy, byla navržena vhodná otopná soustava s ohledem na systém přípravy teplé užitkové vody.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

DUDOK, T. *Heating System for Family House with High Temperature Fuel Cell : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2010, xxx p. Thesis head: Szeliga, Z.

This bachelor thesis deals with design of a heating system for a family house. High temperature fuel cell will be a cogeneration source of heating and electric energy. In the beginning part of the thesis the principle, function and classification of fuel cells with the view to high temperature fuel cells is provided. On the base of the selected fuel cell and calculation of building thermal losses a suitable heating system with the view to the system of warm service water preparation was designed.

# Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
1 Úvod.....	13
2 Historie.....	13
3 Úvod do palivových článků .....	14
4 Princip funkce palivového článku.....	17
5 Typy palivových článků, základní rozdělení a jejich parametry .....	20
5.1 AFC (Alkalický palivový článek) .....	21
5.2 PEMFC (Membránový palivový článek) .....	22
5.3 DMFC (Přímý metanolový palivový článek) .....	23
5.4 PAFC (Palivový článek s kyselinou fosforečnou) .....	24
5.5 MCFC (Palivový článek s tavenými karbonáty) .....	24
5.6 SOFC (Palivový článek s pevnými oxidy) .....	25
5.6.1 Sulzer Hexis (Galileo 1000 N).....	28
6 Palivové plyny pro palivové články.....	31
6.1 Emise .....	32
6.2 Výroba vodíku .....	33
6.3 Elektrolýza vody.....	33
6.4 Reforming uhlovodíku .....	33
6.4.1 Parní reforming .....	33
6.5 Skladování vodíku .....	36
6.5.1 Skladování v plynné fázi.....	36
6.5.2 Skladování v kapalně fázi .....	37
7 Shrnutí palivových článků .....	39
7 Výpočet tepelné ztráty budovy .....	40
7.2 Postup výpočtu .....	41

7.2.1	Tepelná ztráta prostupem tepla .....	41
7.2.2	Tepelná ztráta větráním.....	50
7.2.3	Celková tepelná ztráta celého objektu.....	54
8	Výkon kotle.....	54
9	Otopná soustava.....	55
9.1	Návrh otopné soustavy .....	60
9.1.1	Návrh otopných těles.....	61
10	Čerpadla .....	67
10.1	Návrh čerpadla .....	68
11	Expanzní nádoba .....	72
11.1	Návrh tlakové expanzní nádoby .....	73
11	Kombinovaný zásobník tepla.....	75
12	Provoz a začlenění palivového článku do energetické soustavy rodinného domu .....	77
13	Závěr .....	78
14	Seznam použité literatury.....	79
15	Seznam příloh.....	80



## Seznam použitých značek a symbolů

AFC	Alkalické palivový článek (Alcaline Fuell Cell)
ČSN	Česká Státní Norma
DIR	Přímý vnitřní reforming
DMFC	Přímý metanolový palivový článek (Direct Methanol Fuell Cell)
IIR	nepřímý vnitřní reforming
J	Jih
MCFC	Palivový článek s tavenými karbonáty (Molten Carbonate Fuell Cell)
OZE	Obnovitelné Zdroje Energie
PAFC	Kyselý palivový článek (Phosphoric Acid Fuell Cell)
PEMFC	Membránový palivový článek (Proton Exchange Membrane Fuell Cell)
S	Sever
SOFC	Palivový článek s pevnými oxidy (Solid Oxide Fuell Cell)
TUV	Teplá Užitková Voda
V	Východ
Z	Západ
kW <sub>el</sub>	KiloWatt elektrické energie
kW <sub>t</sub>	KiloWatt tepelné energie

$\alpha_1, \alpha_i$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla, vnější
$\alpha_2, \alpha_{ej}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla, vnitřní
$\eta$	$[-]$	Stupeň využití expanzní nádoby
$\lambda, \lambda_i$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
$\zeta$	$[-]$	Místní ztráty

$\xi$	[-]	Součinitel vřazeného odporu
$\rho$	[m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> ]	Hustota vody
$\emptyset$	[mm]	Průměr (DN)
B	[Pa <sup>0,67</sup> ]	Charakteristické číslo budovy
H	[m]	Dopravní výška (čerpadla)
L	[m]	Délka spár u oken a dveří
M	[-]	Charakteristické číslo místnosti
M	[kg.s <sup>-1</sup> ]	Dopravní množství (čerpadla)
Q <sub>c</sub>	[W]	Celková tepelná ztráta domu
Q <sub>o</sub>	[W]	Základní tepelná ztráta prostupem tepla
Q <sub>OT,c</sub>	[W]	Celkový tepelný výkon všech otopných těles
Q <sub>OT,l</sub>	[W]	Součet tepelných výkonů na levé větvi
Q <sub>OT,p</sub>	[W]	Součet tepelných výkonů na pravé větvi
Q <sub>p</sub>	[W]	Tepelná ztráta místnosti prostupem tepla
Q <sub>v</sub>	[W]	Tepelná ztráta prostoru (místnosti) větráním
P <sub>d,A</sub>	[kPa]	Hydrostatický absolutní tlak
P <sub>h,dov,A</sub>	[kPa]	Nejvyšší dovolený absolutní tlak
P <sub>PC</sub>	[W]	Navrhovaný minimální výkon zdroje
P <sub>TUV</sub>	[W]	Potřebný výkon pro ohřev TUV
R	[Pa.m <sup>-1</sup> ]	Měrná tlaková ztráta
S <sub>c</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Celková plocha
S <sub>D</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Plocha dveří
S <sub>j</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Ochlazovaná část stavební konstrukce
S <sub>s</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Plocha stěny
V	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Objemový průtok (čerpadla)

$V_{et}$	[l]	Objem expanzní tlakové nádoby
$V_i$	[l]	Objem jednotlivých otopných těles
$V_k$	[l]	Objem kotle
$V_m$	[m <sup>3</sup> ]	Vnitřní objem místnosti
$V_v$	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Objemový tok větracího vzduchu
$V_v$	[l]	Množství ohříváné vody
$V_{vH}$	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Objemový tok větracího vzduchu (nuceně)
$V_0$	[l]	Objem vody v celé otopné soustavě
$Y$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	Měrná energie
$c_p$	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita vody
$c_v$	[J.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Objemová tepelná kapacita vzduchu
$d$	[m]	Vnitřní průměr potrubí
$d, l_i$	[m]	Tloušťka vrstev materiálu (výpočet tepelných ztrát)
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Tíhové zrychlení
$h$	[m]	Výška vodního sloupce nad expanzní nádobou
$h$	[m]	Výška místnosti (výpočet tepelných ztrát)
$i_{LV}$	[m <sup>3</sup> /(s.m.Pa <sup>0,67</sup> )]	Součinitel spárové provzdušnosti
$k$	[mm]	Drsnost potrubí
$k_c$	[-]	Průměrný součinitel prostupu tepla všech konstrukcí
$k_{ok,p}$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Součinitel prostupu tepla
$l$	[m]	Délka potrubí
$l_c$	[m]	Celková délka potrubí
$m_{LV}$	[kg.s <sup>-1</sup> ]	Hmotnostní tok v levé větvi
$m_{PV}$	[kg.s <sup>-1</sup> ]	Hmotnostní tok v pravé větvi
$\dot{m}$	[kg.s <sup>-1</sup> ]	Hmotnostní průtok
$n$	[-]	Součinitel zvětšení objemu
$n_{h,1.02}$	[h <sup>-1</sup> ]	Intenzita výměny vzduchu (pro místnost 1.02)

$p_B$	[kPa]	Barometrický tlak
$p_1$	[-]	Přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí
$p_2$	[-]	Přirážka na urychlení zátoku
$p_3$	[-]	Přirážka na světovou stranu
$\Delta p_{\check{c}}$	[Pa]	Dopravní tlak čerpadla
$\Delta p_{j_o}$	[Pa]	Tlakové ztráty vřazenými či místními odpory
$\Delta p_{tr}$	[Pa]	Tlakové ztráty třením
$q$	[W.m <sup>-2</sup> ]	Hustota tepelného toku
$t$	[°C]	Teplota
$t_e$	[°C]	Výpočtová venkovní teplota
$t_i$	[°C]	Teplota místnosti
$t_{ie}$	[°C]	Teplota nevytápěných místností
$t_{gr}$	[°C]	Teplota stavební konstrukce přilehající k zemině
$t_o$	[s]	Doba ohřevu
$t_s$	[°C]	Teplota studené vody
$t_t$	[°C]	Teplota vody na výstupu
$\Delta t$	[K]	Jmenovitý teplotní rozdíl
$w$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost proudění kapaliny v potrubí
$w_v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost větru

# 1 Úvod

Palivové články jsou důkazem neustálého pokroku ve vývoji techniky. Přestože princip funkce palivových článků byl znám už před více jak sto lety, jejich vývoj a praktické využití je realizováno až v dnešní době.

Čím dál tím více je dnes aktuálnější otázka působení lidské činnosti a její dopad na životní prostředí. Je samozřejmé, že negativní vlivy obecně je nutno minimalizovat. Mezi tyto negativní vlivy patří i vlivy spojené s energetickým sektorem. Možností jak toho dosáhnout je více. Například snahou zdokonalovat účinnosti stávajících typu spalovacích zařízení, nebo vývoj nových s vyšší účinností a nižším emisním faktorem, což znamená nižším vlivem na životní prostředí. Způsobem jak zabránit vzniku emisí, nebo jejich snížení na minimum, se může stát cesta obnovitelných zdrojů energie.

V tomto směru mohou hrát palivové články důležitou roli, a to díky své vysoké účinnosti přeměny energie a příznivým emisním charakteristikám.

V úvodu této práce se zabývám problematikou palivových článků od jejich vzniku, až po současný stav vývoje. Je zde popsán princip funkce palivových článků a jejich rozdělení se zaměřením na vysokoteplotní palivové články. Jako zdroj energie pro rodinný dům je zde popsán vysokoteplotní palivový článek od firmy Sulzer Hexis.

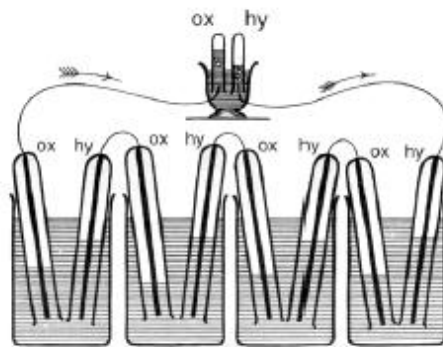
V další části bakalářské práce se budu zabývat návrhem otopné soustavy s ohledem na přípravu teplé užitkové vody. Začlenění palivového článku do otopné soustavy. Výpočtem tepelných ztrát budovy. Návrhu řešení potrubní sítě, výpočtu a návrhu jednotlivých prvků v otopné soustavě.

## 2 Historie

3

Literatura: [2]

Princip fungování palivového článku byl objeven už v roce 1838 vědcem Christianem Friedrichem Schönbeinem, viz obrázek 3. Ten jako první popsal princip funkce palivového článku, tj. reakci vodíku s kyslíkem za vzniku vody a elektrické energie. Popsal jej v publikaci, která vyšla v lednu 1839. V roce 1839 na půdě Royal Institut London uskutečnil první přednášku na toto téma Sir William Grove.



Obrázek 1 - Groevův palivový článek [2]

Po vynálezu dynama Wernerem von Siemensem palivový článek upadl částečně v zapomnění. V roce 1932 sestrojil Francis Bacon první prakticky použitelný článek s elektrolytem tvořeným hydroxidem draselným. V roce 1952 měl zdroj, založený na tomto článku výkon 5 kW.

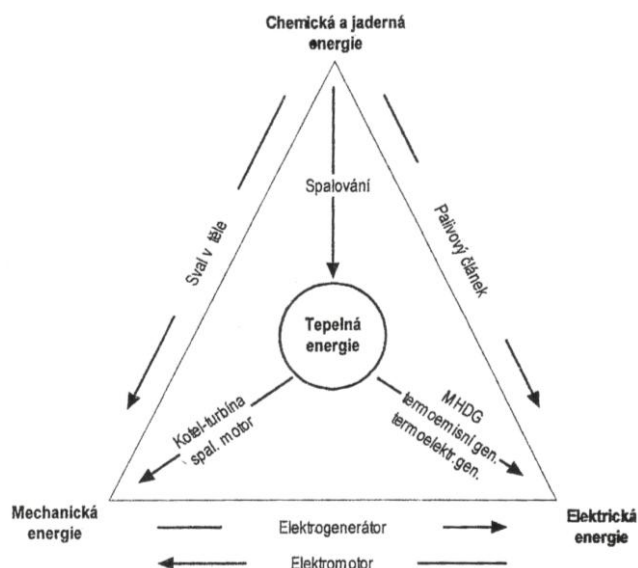
Své skutečné uplatnění měl palivový článek v 60. letech 20. století. Bylo to především díky kosmickému výzkumu, protože palivový článek má oproti jiným zdrojům vyšší poměr energie při nižší hmotnosti. Palivovými články byly například vybaveny kosmické lodi programu Apollo, ale jsou zdrojem energie i pro současné raketoplány.

### 3 Úvod do palivových článků

Literatura: [2, 3]

Palivový článek můžeme definovat jako elektrochemické zařízení, uskutečňující přímou přeměnu chemické energie vodíku a kyslíku na energii elektrickou, vodu a teplo. Principiálně jsou schopny dosahovat vyšší účinnosti přeměny energie, než dnes standardně používané systémy výroby elektrické energie založené na tepelném oběhu. Nevyužívá se tedy tepla a proces není limitován Carnotovým cyklem. Chemická energie se takto přímo přeměňuje v elektrickou

energii. Při dnešním využití elektrické energie a vznikajícího tepla dosahují keramické palivové články účinnosti až kolem 80 %, viz obrázek 6.

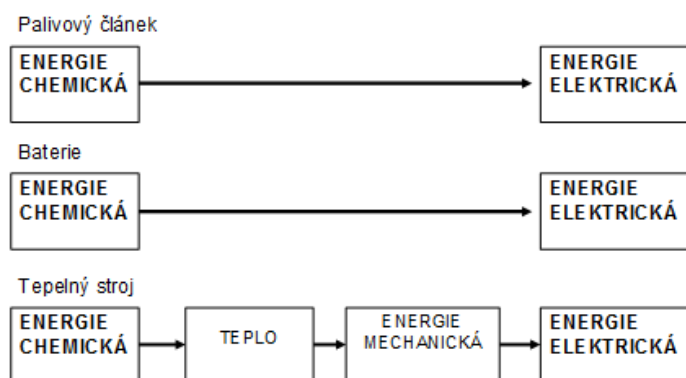


Obrázek 2 - Schematické znázornění přeměn energií (a) [2]

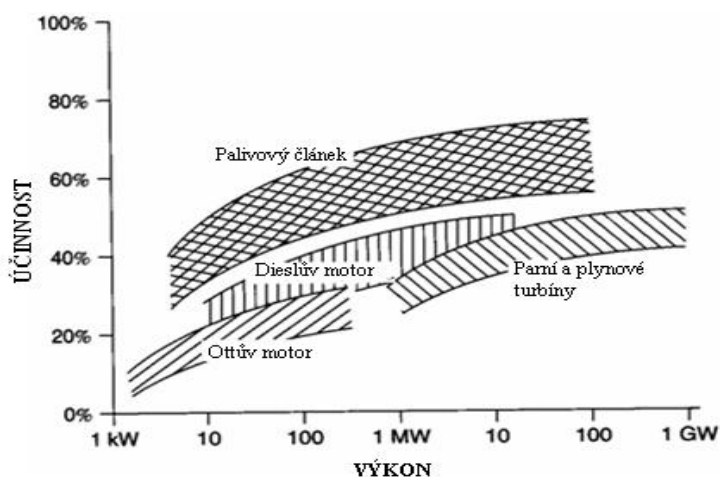
Takže v palivových člancích je tedy chemická energie paliva transformována přímo na elektrickou energii. Při srovnání s klasickým spalováním, spalováním fosilních paliv v tepelných elektrárnách, odpadá základní mezistupeň transformace energie, tepelný oběh, který má zásadní vliv na celkovou účinnost přeměny energie. V případě zhodnocení účinnosti tepelných elektráren musíme vzít v úvahu celý řetězec navazujících přeměn energií, kdy každá je zatížená určitou nedokonalostí (ztrátami). Při výrobě elektrické energie klasickým způsobem, elektrárenskými bloky, je palivo oxidováno a dochází k uvolňování jeho chemické energie ve formě tepelné energie. Tato energie je následně odebírána vzniklým produktům oxidace, spalinám, pracovní látkou Rankin-Clausiova parního cyklu. Dále je v tomto cyklu energie pracovní látky přeměněna prostřednictvím parní turbíny na mechanickou energii a následně v alternátoru přeměněna na elektrickou energii, viz obrázek 2 a 3.

Jedním z dalších možných způsobů transformace chemické energie na elektrickou je využití tepelných strojů, jako jsou spalovací motory, spalovací turbíny atd., s transformací uvolněné tepelné energie na mechanickou energii a následně v alternátoru na energii elektrickou. U všech těchto zmíněných způsobů přeměny

chemické energie na elektrickou je nutné projít cyklem mezistupňů přeměn energií, a to z chemické energie spalováním na tepelnou, z tepelné na mechanickou a z mechanické na elektrickou. Z následujícího textu vyplívá, že jednotlivé přeměny energií v reálném oběhu jsou zatíženy vlastními ztrátami a omezeními.



Obrázek 3 - Schematické znázornění přeměn energií (b) [3]



Obrázek 4 - Porovnání teoretické účinnosti jednotlivých energetických systémů [7]

Maximální teoretická účinnost tepelného cyklu je dána účinností ideálního teoretického tepelného oběhu, Carnotova cyklu. Účinnost daného tepelného oběhu a to buď Rankin-Clausiova nebo cyklu spalovacích motorů, popř. turbín, je pak menší než teoretická účinnost porovnávacího oběhu dané technologie. Takže maximální dosažitelná účinnost daného tepelného cyklu je menší než teoretická hodnota Carnotova oběhu. Vysoká účinnost palivového článku, a to i při nízkých provozních teplotách, je významnou předností této technologie, viz obrázek 4.



Přeměna chemické energie na elektrickou se většinou děje v generátorech oklikou přes kinetickou energii, která vzniká při spalování paliva. Palivové články vyrábějí elektřinu přímo, a proto by měly být účinnější, jednodušší a spolehlivější. Zatím však jejich většímu komerčnímu využití částečně brání technické překážky a pořizovací náklady.

Svou činností se palivový článek podobá klasickým akumulátorům (baterie), ve kterých rovněž probíhá přímá přeměna chemické energie na elektrickou. Na rozdíl od nich však používá z vnějšku dodávané palivo, což mu umožňuje libovolně dlouhý provoz.

V současné době je veřejnosti nejvíce známá technologie kyslíko-vodíkového palivového článku v rámci vodíkového pohonu automobilů. Vodík může být vyroben např. pomocí elektrolýzy vody a kyslík je obsažen v atmosféře. Skladování vodíku v automobilových nádržích je v neustálém vývoji díky tomu, že vodík je ve směsi se vzduchem vysoce výbušný. Nejnovější výzkumy ukazují na použití směsi železa a titanu jako stabilizátoru. Navíc účinnost celého cyklu (elektřina → vodík → elektřina) dosahuje kolem 30 – 40 %, (benzínové motory – 18 %).

V současnosti jsou už palivové články používány v raketoplánech a v ponorkách.

## **4 Princip funkce palivového článku**

Literatura: [5, 2]

Všechny technologie palivových článků jako palivo používají vodík.

Princip činnosti je velmi jednoduchý. Zakládá se na tom, že sloučením vodíku s kyslíkem vzniká voda. Přitom se uvolňuje teplo a elektrická energie. Aby reakce probíhala řízeně – hovoří se o „studeném spalování“.

Palivový článek můžeme definovat jako elektrochemické zařízení, uskutečňující přímou přeměnu chemické energie vodíku a kyslíku na energii elektrickou, vodu a teplo. Tato přeměna se děje katalytickými reakcemi na elektrodách a je v podstatě založena na obráceném principu elektrolýzy vody. Princip činnosti palivového článku si můžeme vysvětlit pomocí jednoduchého schématu na obrázku 5.

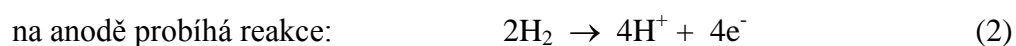


Obrázek 5 - Schéma palivového článku [5]

Palivový článek se skládá z elektrolytu (žlutá barva), elektrod (modrá barva) a elektrického okruhu. Elektrolyt musí být iontově vodivý, v našem případě se jedná o protonový vodič. Pro elektrický proud musí být dielektrikem, elektrony tedy propouštět nesmí. Vodík (palivo) je přiváděn k anodě, na které se katalyticky štěpí na protony a elektrony. Protony přechází elektrolytem, který vyplňuje prostor mezi katodou a anodou ke katodě, zatímco uvolněné elektrony přechází vnějším vedením a produkují elektrický proud. Ke katodě je přiváděn kyslík (oxidant), který zde katalyticky reaguje s prostoupenými protony a elektrony za vzniku vody. Na obou elektrodách vzniká potenciální rozdíl kolem jednoho voltu, který při zatížení článku poklesne obvykle na hodnoty 0,5 – 0,8 V. Aby bylo dosaženo potřebného vyššího napětí, jsou desítky článků sériově uspořádány do jednotlivých svazků stavebnicovým způsobem. Jednotlivé svazky mohou být opět libovolně propojovány sériově nebo paralelně podle požadavků na produkované napětí a proud.

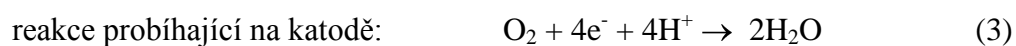
Důležité je si uvědomit, že za běžných stavových podmínek a bez dostatečné aktivační energie spolu plyny vzájemně nereagují. Za přístupu dostatečného

množství aktivační energie a za příznivých podmínek je pak molekula vodíku oxidována a produktem reakce je voda. Při reakci je uvolněná energie ve formě tepelné energie.

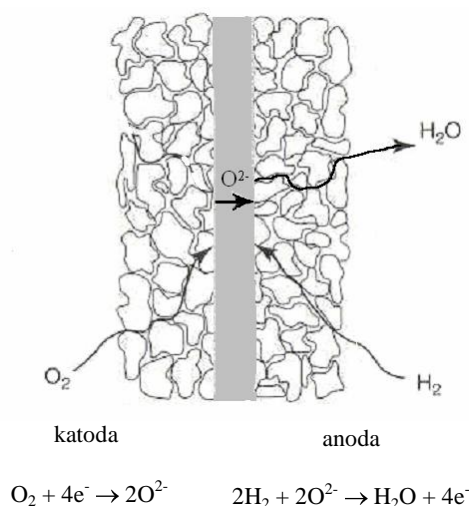


elektrolytem procházejí ionty (protony vodíku)  $4\text{H}^+$

vnějším elektrickým obvodem procházejí elektrony  $4\text{e}^-$



Důležitou součástí palivového článku je látka, která umožňuje štěpení plynů (např. reakce 2). Nazýváme ji katalyzátor. Tato látka je pak u většiny palivových článků nanášena na rozhraní elektrody a elektrolytu, nebo už samotný materiál elektrody je již katalyzátorem pro chemickou reakci. U palivových článků typu SOFC je katalyzátorem nikl.



Obrázek 6 - Schéma palivového článku SOFC - Palivový článek s tuhými oxidy [2]

## 5 Typy palivových článků, základní rozdělení a jejich parametry

Literatura: [9, 2, 3, 6, 7]

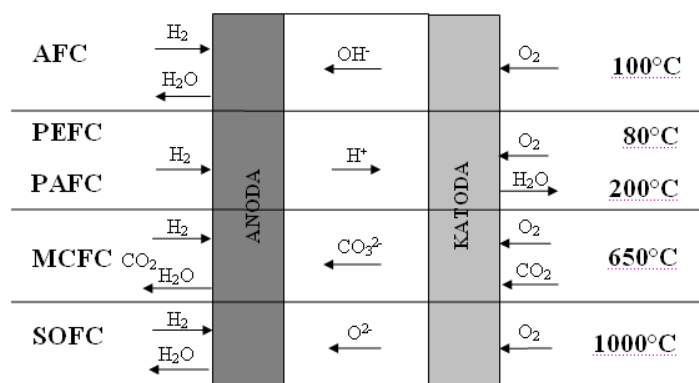
Základním kritériem pro rozdělení jednotlivých technologií palivových článků je druh elektrolytu, podle použitého elektrolytu je odvozen i název daného druhu palivového článku, viz tabulka 1.

Elektrolytem v palivových článcích může být celá řada různých látek a to jak kapalných tak i pevných.

Dalším důležitým kritériem pro rozdělení palivových článků je pak jejich pracovní teplota. Palivové články se na základě tohoto kritéria dělí na články nízkoteplotní a vysokoteplotní. Do skupiny nízkoteplotních palivových článků patří AFC, PEMFC, DMFC (v některých případech také PAFC), do vysokoteplotních potom systémy MCFC a SOFC. Někdy se používá také označení středněteplotní palivové články. Do této skupiny spadá technologie PAFC.

Vymezení provozních teplot pro jednotlivé skupiny palivových článků:

Nízkoteplotní	60 ÷ 160 °C
Středněteplotní	160 ÷ 220 °C
Vysokoteplotní	600 ÷ 1 100 °C



Obrázek 7 - Typy palivových článků, využívaný iont, pracovní teploty [2]

Každá z technologií má svoje specifikace, technologická a konstrukční omezení.

Tabulka 1 - Rozdělení palivových článků a jejich parametry [9]

Druh	Nízkoteplotní			Středněteplotní	Vysokoteplotní	
	Alkalické AFC (Alcaline Fuel Cells)	Membránové PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)	Přímé metanolové DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)	Kyselé PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)	S tavenými karbonáty MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)	S pevnými oxidy SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)
Elektrolyt	Hydroxid draselný	Iontoměničná membrána	Iontoměničná membrána	Kyselina fosforečná	Tavené karbonáty lithia, vodíku, draslíku	Oxid zirkoničitý s příměsí yttria
Pracovní teplota (°C)	60 – 100	20 – 80	20 – 130	170 – 250	600 – 650	800 – 1000
Pohyblivý iont	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Elektrodové reakce	A H <sub>2</sub> +2OH <sup>-</sup> →2H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> K 1/2O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> →2OH <sup>-</sup> Σ H <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O	A H <sub>2</sub> →2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> K 1/2O+2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub> O Σ H <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O	A CH <sub>3</sub> OH+H <sub>2</sub> O→CO <sub>2</sub> +6H <sup>+</sup> +6e <sup>-</sup> K 3/2O <sub>2</sub> +6H <sup>+</sup> +6e <sup>-</sup> →3H <sub>2</sub> O Σ CH <sub>3</sub> OH+3/2O <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> +2H <sub>2</sub> O	A H <sub>2</sub> →2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> K 1/2O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub> O Σ H <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O	A H <sub>2</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> →H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> K 1/2O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> →CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Σ H <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub>	A H <sub>2</sub> +O <sup>2-</sup> →H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> K 1/2O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> →O <sup>2-</sup> Σ H <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O
Účinnost (%) (elektrická)	45 – 60	40 – 60	40	38 – 45	45 – 60	50 – 65
Výkon(kW)	Do 20	Do 250	Do 10	50 – stovky kW	Do několika MW	Do několika MW
Používané palivo	Vodík	Vodík Reformovaná paliva	Methanol (Ethanol)	Vodík Reformovaná paliva	Vodík Nepřímá paliva	Všechny druhy bez reformování
Možné aplikace	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Univerzální	Přenosné články	Výroba energií	Výroba energií	Výroba energií

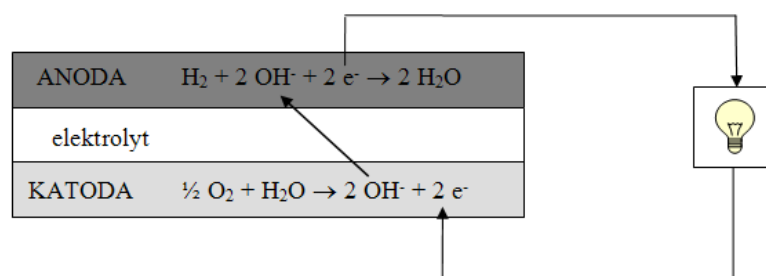
## 5.1 AFC (Alkalický palivový článek)

Dosahují nejvyšších účinností, ze všech známých typů palivových článků. Palivem je čistý vodík a kyslík. Při provozní teplotě 100 °C vykazují účinnost 60 až 70 %. Výzkumem tohoto typu palivového článku byly vyvíjeny od konce 50. let díky vesmírnému programu.

Reakce probíhající v palivovém článku typu AFC můžeme popsat následovně:



- Provozní teplota: 80 °C
- Elektrolyt: zředěný hydroxid draselný KOH (30%)
- Palivo: vodík
- Výkon: do 20 kW
- Účinnost (el.): 60 – 70 %



Obrázek 8 - Schematické znázornění AFC článku [2]

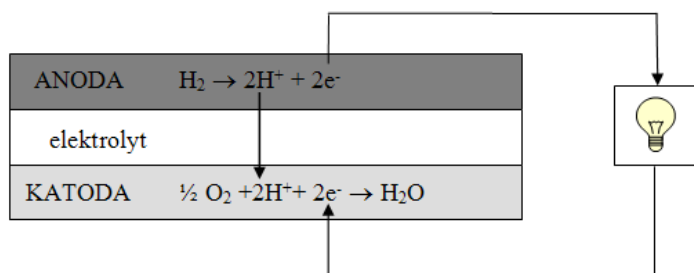
## 5.2 PEMFC (Membránový palivový článek)

Tyto články s polymerním elektrolytem jsou založeny na principu polymerové polopropustné membrány, která dovolí průchod jen jádrům vodíku (protonům). Pracují při provozních teplotách (60 - 80 °C), proto jsou středem pozornosti automobilového průmyslu, který je hodlá využít pro pohon elektromobilů a elektrobusů. Palivové články PEMFC vyžadují vysokou čistotu vstupních plynů a již nepatrný podíl oxidů uhlíku snižuje jejich výkon. Při použití zemního plynu jako paliva, vyžaduje článek pečlivou separaci vodíku. Nejmenší PEMFC články provozované na čistý vodík z bombiček jsou využívány i jako kapesní proudový zdroj pro notebooky.

Reakce probíhající v palivovém článku typu PEMFC:



- Provozní teplota: 80 °C
- Elektrolyt: membrána s iontovou vodivostí (Nafion R 117, Dow,...)
- Palivo: vodík, reformovaná paliva
- Výkon: do 250 kW
- Účinnost (el.): 50 – 68 %



Obrázek 9 - Schematické znázornění PEMFC článku [2]

### 5.3 DMFC (Přímý metanolvý palivový článek)

Jako palivo se používá metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Metanol je považováno za palivo s velkou budoucností a to především v oboru mobilních aplikací palivových článků. Výhodou metanolu oproti vodíku využívanému v aplikacích palivových článků je mnohem jednodušší, prostorově a hmotnostně méně náročné skladování a doprava. DMFC článek má podobnou konstrukci jako PEMFC článek a jeho výhodou oproti PEMFC článku je absence reformeru (pro metanol), což by mělo za následek další nárůst hmotnosti. Z tohoto důvodu má článek velký potenciál a jak ve stacionárních tak i mobilních systémech.

Reakce probíhající v palivovém článku typu DMFC

- reakce probíhající na anodě:  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$  (8)
- reakce probíhající na katodě:  $3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$  (9)
- Provozní teplota: 80 – 130 °C
- Elektrolyt: membrána s iontovou vodivostí
- Palivo: metanol (etanol)
- Výkon: do 20 kW
- Účinnost (el.): 20 – 30 %

## 5.4 PAFC (Palivový článek s kyselinou fosforečnou)

Reakce probíhá při teplotách kolem 160 až 250 °C a vlastní elektrická účinnost přeměny se pohybuje kolem 42 %. Až na praktických 80 % se však může vyšplhat v roli kogenerátorů - spojených zdrojů elektřiny a tepla. Protože čistý vodík i kyslík jsou příliš drahými plyny a zacházení s nimi není právě nejbezpečnější, můžeme vodík získávat na místě rozkladem zemního plynu v tzv. reforméru a konvertoru při teplotě 800 °C, a kyslík čerpáním přímo ze vzduchu. Tyto palivové články oproti AFC nejsou tolik náchylné na CO<sub>2</sub> v palivu.

Reakce na článku potom odpovídají reakcím vyskytujícím se u palivového článku typu PEMFC:



- Provozní teplota: 200 °C
- Elektrolyt: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (kyselina fosforečná)
- Palivo: vodík, reformovaná paliva
- Výkon: 50 – stovky kW
- Účinnost (el.): 55 %

## 5.5 MCFC (Palivový článek s tavenými karbonáty)

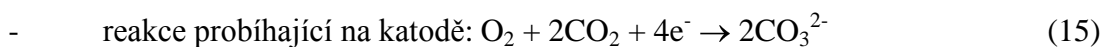
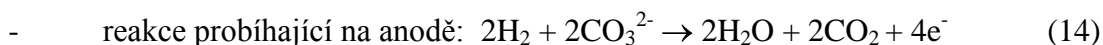
Palivem pro tento typ palivových článků je vodík a oxid uhelnatý. Díky vysokým teplotám (650 °C), která je potřebná k zajištění dostatečné vodivosti uhličitanového elektrolytu, dovoluje použití levných kovových součástí článku.

Reakce pro oxid uhelnatý:

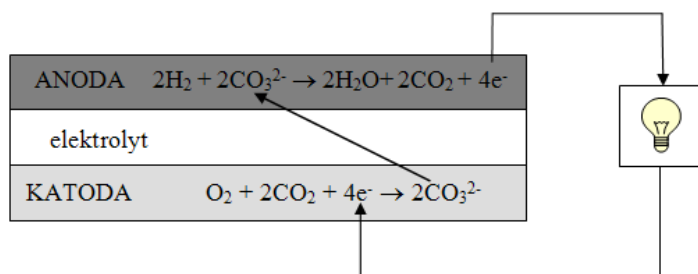




Reakce pro vodík:



- Provozní teplota: 650 °C
- Elektrolyt: tavené karbonáty lithia, sodíku, draslíku
- Palivo: vodík, CO
- Výkon: do několika MW
- Účinnost (el.): 45 – 60 %



Obrázek 10 - Schematické znázornění MCFC článku [2]

## 5.6 SOFC (Palivový článek s pevnými oxidy)

Palivové články typu SOFC se řadí do skupiny vysokoteplotních palivových článků. Pracují v rozmezí teplot 800 – 1 100 °C. Palivem pro tyto články je vodík a oxid uhelnatý. SOFC článek je vhodný pro uhlovodíkové plyny (s použitím např. parního reformingu). Články je možné kombinovat s využitím tepla jako kogenerační zdroj energie, případně i tlaku produkovaných plynů v turbínách.

„Při provozu SOFC článků dochází k časovým a místním rozdílům teplot, složení plynů a tlaku. Teplotní rozdíly mezi vstupem a výstupem plynů dosahují běžně hodnot okolo 100 °C. V případě vnitřního, endotermního reformování metanu jsou místní teplotní rozdíly daleko vyšší. Teplotní gradienty vyvolávají mechanická napětí ve článku a nerovnoměrnosti elektrochemických dějů a proudových hustot.

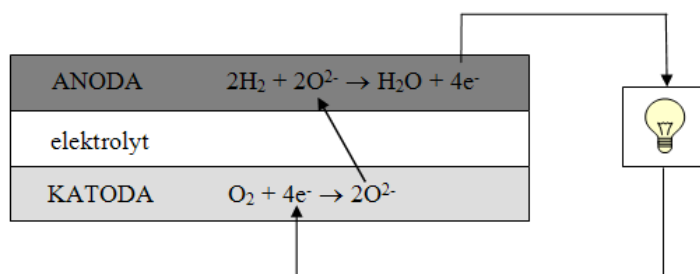
Keramické materiály článků špatně snášejí velké a opakované změny teplot při současné mechanické zátěži, což může vyvolat i jejich praskání. Utěsnění např.

přívodu a odvodu plynů je při měnících se vysokých teplotách také problémem. Jako těsnicí hmoty se používají plsti a tkaniny z keramických vláken, speciální keramické tmely a skla nebo kombinace plstí se speciálními keramickými tmely. Dlouhodobě spolehlivá uspořádání SOFC článků do baterií a bloků, vhodné tvary a materiály spojovacích a bipolárních členů, vhodné vnitřní rozdělovače plynů pro zmenšení tepelných nerovnoměrností a těsnění se stále hledají a zkoušejí a nebývají uváděny v tzv. "otevřené" literatuře.“ [3]

Podrobnosti o konstrukci, vnitřní struktuře, materiálech a výzkumech článku nebývají z důvodu ochrany know-how většinou otevřeně prezentovány.

S použitím principu SOFC článku se můžeme setkat v každodenním životě. Známý je především jako „lambda sonda“.

Reakce pro vodík jakožto palivo:



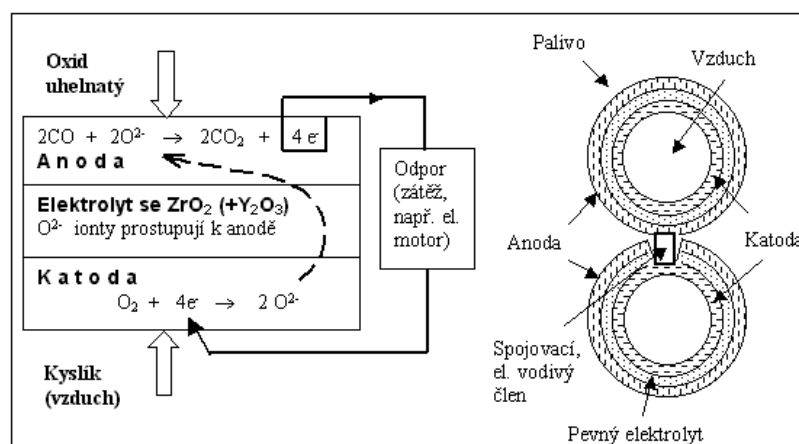
Obrázek 11 - Schematické znázornění SOFC článku [2]

Průběh reakce pro vodík:

- „Reakční plyny, kyslík a vodík, jsou odděleně dopravovány k prostorám elektrod. Kyslík na stranu anody, vodík na stranu katody, dochází ke kontaktu těchto plynů s katalyzátory.
- Molekula vodíku je na povrchu katalyzátoru štěpena na dva atomy vodíku a následně na dva protony  $\text{H}^+$ , přitom každý z atomů odevzdává jeden elektron.

- Elektrony tečou vnějším elektrickým obvodem od anody ke katodě.
- Každé čtyři elektrony, po dosažení katody, rekombinují s molekulou kyslíku.
- Vzniklé kyslíkové ionty (anionty)  $O^{2-}$  následně procházejí elektrolytem k anodě
- Kyslíkové ionty  $O^{2-}$  odevzdávají negativní náboje protonům vodíku  $H^+$  za vzniku vody  $H_2O$ .“ [2]

- Provozní teplota: 800 – 1000 °C
- Elektrolyt: stabilizovaný zirkonoxid ( $ZrO_2/YO_3$ )
- Palivo: vodík, CO
- Výkon: do několika MW
- Účinnost (el.): 50 – 65 %



Obrázek 12 - Schéma palivového článku typu SOFC pro využití CO jako paliva a schéma uspořádání a propojení trubkových palivových článků [6]

### Elektrolyt:

Jako elektrolyt zde slouží iontově vodivý keramický materiál (tuhá látka) na bázi oxidů. Díky pevnému stavu elektrolytu je SOFC článek principiálně konstrukčně jednodušší a kompaktnější než ostatní palivové články. Elektrolytem je

oxid zirkoničitý  $\text{ZrO}_2$  stabilizovaný oxidem yttria  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Tento materiál vykazuje při teplotách nad  $750\text{ }^\circ\text{C}$  dobrou vodivost  $\text{O}^{2-}$  iontů. Elektrody jsou s příměsí niklu, takže síra a její sloučeniny působí jako katalyzátorový jed. Další materiály jsou stále v stadiu vývoje.

#### **Anoda:**

Jako materiál se převážně používá směs keramicko-kovové sintrované materiály na bázi niklu a stabilizovaného  $\text{ZrO}_2$ . Anoda má porézní strukturu, především kvůli co největší reakční plochy a zabezpečení dobrého transportu plynu. Materiál může být uzpůsobován k přímému katalytickému reformování, především metanu.

#### **Katoda:**

Materiál katody má porézní strukturu ze stejného důvodu jako anoda. Jsou vyrobeny buď z  $\text{LaMnO}_3$  dopovaného stronciem, nebo různých směsných oxidů typu perovskit s p-typem vodivosti a směsnou iontovou a elektronovou vodivostí. Tyto materiály umožňují společně s elektrolytem LSGM provoz i za teplot pod  $800\text{ }^\circ\text{C}$ .

### **5.6.1 Sulzer Hexis (Galileo 1000 N)**

Jednotka Galileo je stavěná pro menší výkony a je vhodná pro jednogenerační rodinné domy. Tato jednotka nahrazuje klasické plynové kotle. Umožňuje dodávat jednak elektrický, ale i tepelný výkon v závislosti na poptávce. Pokud spotřeba tepla přesáhne  $2\text{ kW}_t$ , zapne se přídatný hořák, který je schopen dodat až  $20\text{ kW}_t$  tepelné energie. Jednotka Galileo pracuje efektivně s nízkými emisemi a téměř bezhlučně.

#### **Konstrukce:**

Tento palivový článek je konstruován v tzv. planárním uspořádání. Jeho výhodou je jednoduchá výroba jednotlivých částí modulu. Tyto části (anoda, katoda, elektrolyt) jsou vyráběny v tloušťkách  $0,1$  až  $0,2\text{ mm}$ , tím se dosahuje menšího odporu a větší proudové hustoty. Při návrhu a konstrukci se musí přihlížet na tepelnou roztažnost jednotlivých materiálů (částí). Galileo je rozdělen na dvě části. V horní části se nachází modul palivového článku, spodní část obsahuje komponenty

pro přeměnu energie, výměník, přídatný hořák, měnič a čerpadlo. Měnič slouží ke konverzi stejnosměrného proudu na střídavý proud. Tento systém od firmy Hexis je tvořen články ve tvaru disků s otvorem uprostřed, každý modul (anoda, katoda, elektrolyt) je oddělen bipolární deskou. Tento systém tak tvoří 60 jednotlivých vrstev (buněk) a ty dohromady dávají 1 kW<sub>el</sub>. Vnitřní otvor slouží jako kanál pro dodávku paliva.

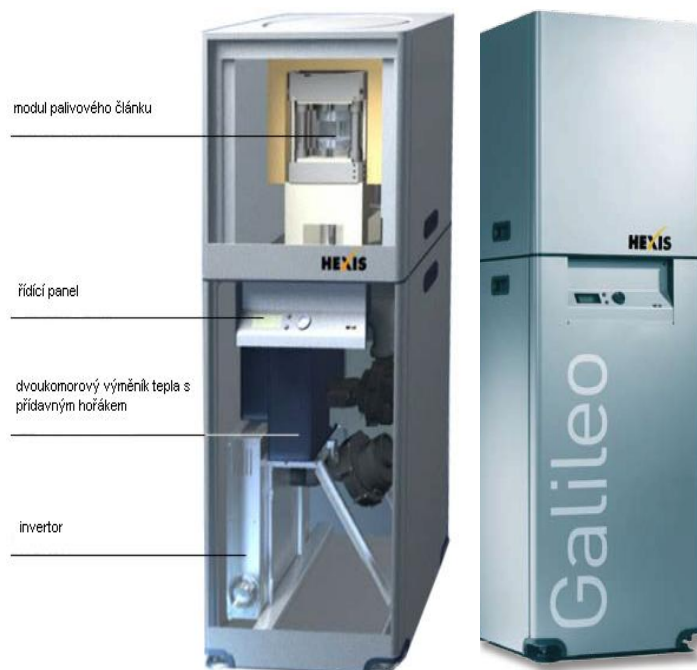
### Technické specifikace:

#### Konstrukční údaje

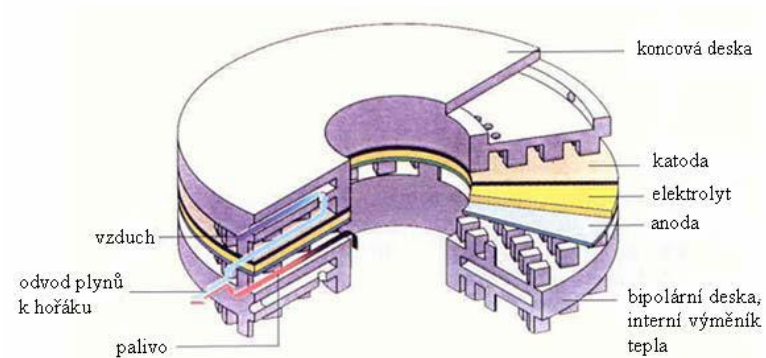
Elektrický výkon	1 kW <sub>el</sub>
Tepelný výkon	2 kW <sub>t</sub>
Tepelný výkon přídatného hořáku	4 – 20 kW
Elektrická účinnost	30 %
Typ palivového článku	Hexis SOFC
Palivo	zemní plyn,
Elektrické připojení	230 V, 50 Hz

#### Rozměry a hmotnost

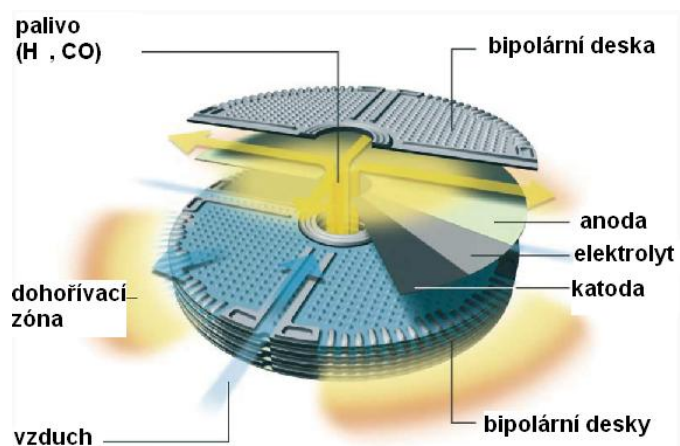
Šířka x délka x výška	55 x 55 x 160 cm
Požadavky na místo	3 m <sup>2</sup>
Celková instalovaná hmotnost	170 kg
Minimální výška místnosti	2,05 m



Obrázek 13 - Průřez jednotkou Galileo od firmy Sulzer Hexis [7]



Obrázek 14 - Planární uspořádání systému od firmy Sulzer Hexis (a) [2]



Obrázek 15 - Planární uspořádání systému od firmy Sulzer Hexis (b) [7]

## 6 Palivové plyny pro palivové články

Literatura: [2, 3, 6, 8]

Vodík je základním palivem pro všechny uvedené technologie palivových článků, pro některé články je palivem pouze čistý vodík. Náročnější na čistotu paliva jsou nízkoteplotní palivové články, u kterých může vlivem nečistot v palivu dojít k nevratnému poškození palivového článku. Především se to týká katalyzátorů a elektrolytu. Složení paliva musí být v dané toleranci, viz tabulka 2.

Tabulka 2 - Reakční plyny palivových článků, tolerance nežádoucích složek plynu[2]

<b>Plyn \ Paliv. článek</b>	<b>PEMFC</b>	<b>AFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
H <sub>2</sub>	palivo	palivo	palivo	palivo	palivo
CO	< 10 ppm	0	< 2 %	palivo	palivo
CO <sub>2</sub>	tolerance	0	tolerance	tolerance	tolerance
N <sub>2</sub>	tolerance		<2%	tolerance	tolerance
Cl	< 0,05 ppm		< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm
S (jako H <sub>2</sub> S a CS)	0 (Probíhá výzkum)		< 50 ppm	< 0,5 ppm	< 1 ppm
Tuhé částice	0	0	< 1mg/m <sup>3</sup>	0	< 1mg/m <sup>3</sup>

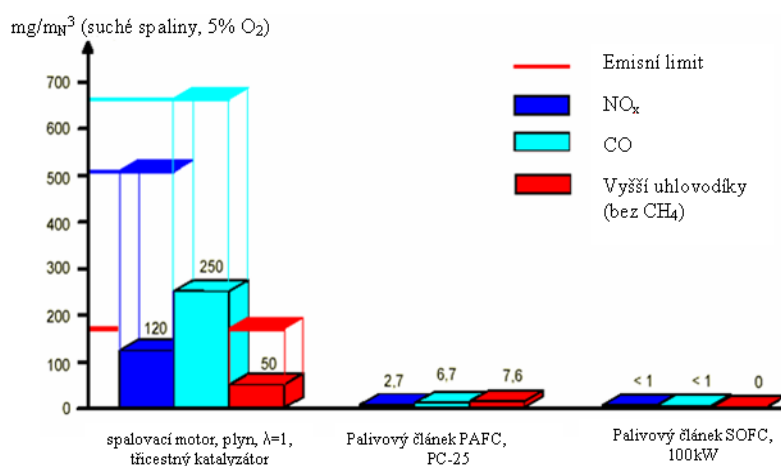
Jako palivo u vysokoteplotních palivových článků pak můžeme použít například oxid uhelnatý, protože se chová jako inertní plyn, ale také směsi CO s vodíkem, uhlovodíky, alkoholy, LPG apod. Tyto články jsou velmi citlivé na obsah síry v palivu, prach, saze, dehty a těžké kovy.

Prozatím se jako nejrozšířenější zdroj paliva v dnešní době jeví zemní plyn.

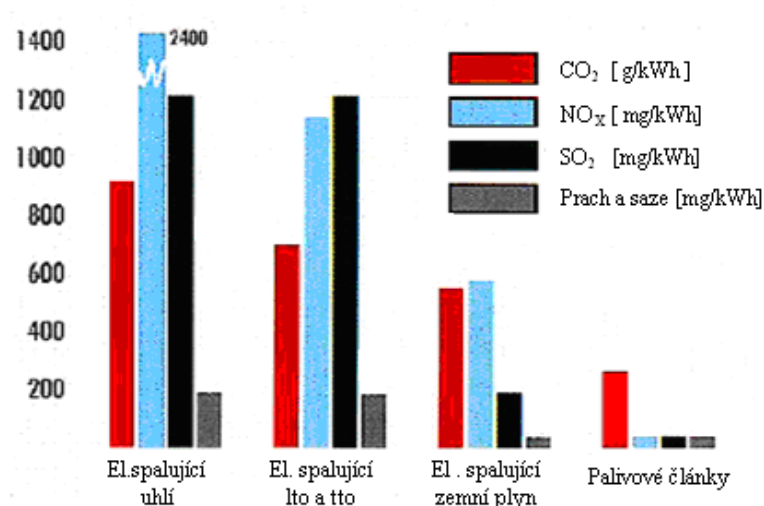
Existují i jiné způsoby získávání vodíku. Jako perspektivní metody se například jeví elektrolýza vody. Zdrojem palivového plynu však mohou být i plyny jako je bioplyn z anaerobní digesce, degazační plyn, skládkový plyn nebo se může využívat plyn ze zplyňování biomasy, uhlí atd.

## 6.1 Emise

Určitě neméně důležitým parametrem při rozhodování mezi klasickým spalovacím kotlem a palivovým článkem jsou emise. Palivové články nemají nulové emise, avšak při srovnání s klasickými zdroji na fosilní paliva mají mnohonásobně nižší emise, jak můžeme vidět na obrázcích 16 a 17. Pokud chceme označit palivové články jako bezemisní technologii, musíme k výrobě vodíku použít OZE. Pak lze říci, že odpadním produktem je pouze voda.



Obrázek 16 - Srovnání emisí palivových článků systému PAFC a SOFC s emisemi spalovacího motoru [3]



Obrázek 17 - Orientační srovnání měrných emisí palivových článků s emisemi elektrárenských bloků spalujících fosilní paliva (palivové články pracující se zemním plynem) [3]



## 6.2 Výroba vodíku

Získávání vodíku jakožto palivo pro palivové články má smysl jen tehdy, pokud pro výrobu použijeme OZE, potom můžeme palivové články nazvat jako technologii bez emisí.

Obnovitelné zdroje energie (OZE):

- větrná energie (výroba elektrické energie za účelem elektrolýzy vody)
- energie z biomasy (zplyňování, reformování bioplynu, metanu)
- vodní energie (výroba elektrické energie za účelem elektrolýzy vody)

další OZE, které v budoucnu mohou hrát podstatnější roli, jsou:

- fotovoltaika (výroba elektrické energie za účelem elektrolýzy vody)
- termolýza s pomocí solární energie
- bakterie, řasy

## 6.3 Elektrolýza vody

Elektrolýza je elektrochemický oxidačně-redukční děj, pomocí kterého se získává vodík a kyslík o vysoké čistotě. Ovšem tento proces je ve srovnání s jinými metodami získávání vodíku poměrně drahý. Je také energetický náročný. Pro výrobu je potřeba velký a levný zdroj energie např. vodní elektrárny ( OZE ).

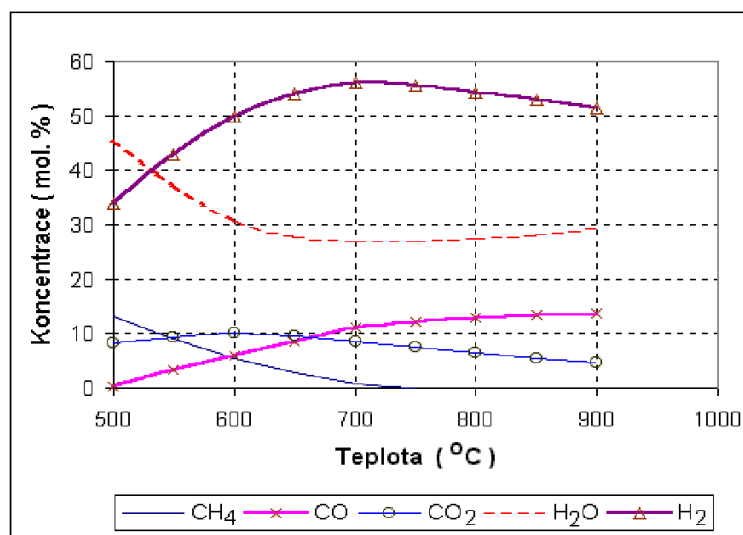
## 6.4 Reforming uhlovodíku

V současnosti nejpoužívanější metoda výroby vodíku. Především parní reforming je běžně používaná metoda výroby vodíku hlavně v chemickém průmyslu.

### 6.4.1 Parní reforming

Je to proces, při kterém dochází ke štěpení. Je to přeměna uhlovodíků a alkoholů na jednodušší sloučeniny. Toto palivo má vyšší výhřevnost než původní směs. Tento postup je vhodnou metodou při výrobě kvalitního paliva pro palivové články, protože výsledný produkt můžeme rovnou použít jako palivo. Pokud palivo obsahuje síru ve větším, než povoleném množství je vhodné použít odsiřovací jednotku. Proces parního reformingu se provádí za vysokých teplot a to nad 500 °C,

běžně tak kolem 700 – 800 °C. Reformování je silně endotermní reakcí a vyžaduje přívod tepla a přítomnost vhodných katalyzátorů. Následující graf udává příklad složení plynů po reformování metanu přebytkem vodních par a změny ve složení plynů s teplotou, viz obrázek 18.



Obrázek 18 - Rovnovážné koncentrace plynů při reformování metanu vodní parou za teplot nad 500 °C (P = 0,1 MPa). Uvažován přibližně dvojnásobný přebytek vodní páry [6]

### Parní reforming zemního plynu:

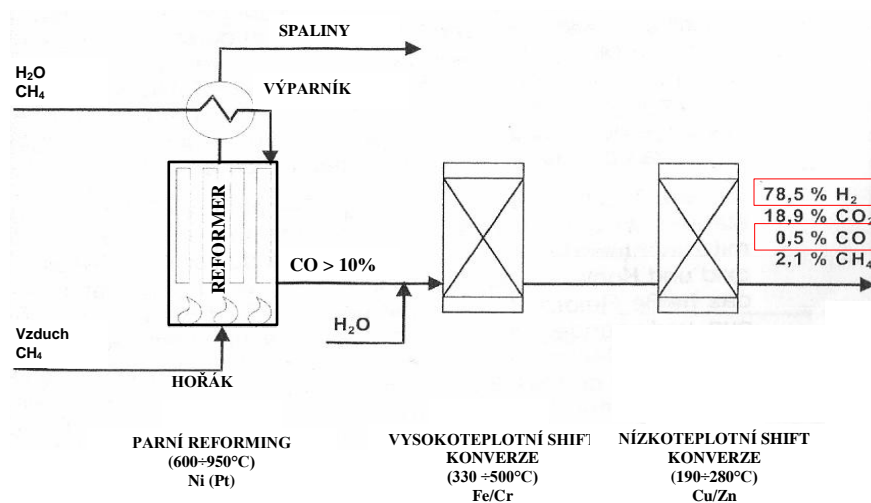
V problematice palivových článků je parní reforming, a to především zemního plynu, jednou z důležitých věcí. Zemní plyn je tvořen přibližně 98 % metanu. Reforming zemního plynu (metanu) je charakterizován dvěma nezávislými reakcemi viz rovnice (28) a (29).



Katalyzátorem pro tyto reakce bývá většinou nikl, popř. platina. Reakce probíhají při teplotách 600 – 900 °C. Jako optimální molární objem vodní páry a metanu je  $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4=2$ . Tyto reakce jsou reakce endotermní, takže do procesu musí být přiváděno teplo. Do energetické bilance je potřeba započítat i teplo potřebné k výrobě vodní páry (20).



Složení výsledného paliva je závislé na parametrech procesu, jimiž jsou teplota, tlak a přebytek vodních par. Po reformingu zemního plynu je výsledná koncentrace vodíku okolo 60 % a oxidu uhelnatého v rozmezí 10 % objemových. Pro vysokoteplotní palivové články je tato směs z procesu parního reformingu dostatečně vyhovující. Vysoká úroveň CO je však nevhodná pro nízkoteplotní palivové články. Proto se za reformér zařazují další stupně zpracování plynu, konverze CO nazývané shiftkonverze.



Obrázek 19 - Schéma externího parního reformingu se zařazenou shiftkonverzí [3]

### Vnitřní reforming:

Vysokoteplotní palivové články pracují při tak vysokých teplotách, které provádění parního reformování přímo uvnitř článku. Tento děj lze realizovat pomocí tepla z reakcí palivového článku. Vnitřní reforming můžeme rozdělit do dvou skupin:

**Přímý vnitřní reforming (DIR):** Proces reformování uhlovodíku probíhá přímo na anodě obohacené o Ni. Reakční teplo a vodní pára vznikají přímo uvnitř palivového článku.

**Nepřímý vnitřní reforming (IIR):** Proces reformování probíhá v bezprostřední blízkosti článku v oddělené komůrce a z reakce uvnitř palivového článku si odebírá pouze teplo pro endotermickou reakci. Ovšem pára a vodík nejsou bezprostředně ve styku s anodou.

## 6.5 Skladování vodíku

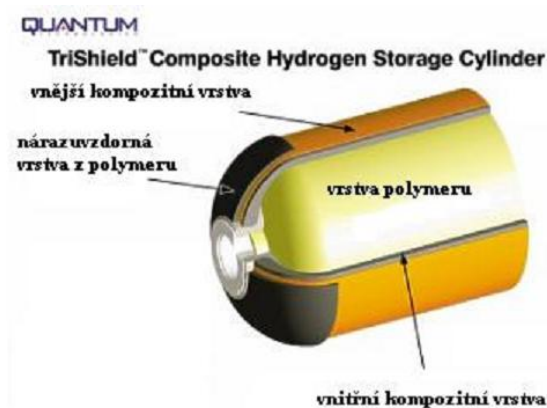
Vodík má v plynném skupenství nejnižší hustotu a druhý nejnižší bod varu (253 °C) ze všech známých látek. Jeho vlastnosti zásadně ovlivňují problematiku dopravy a skladování hlavně v mobilních aplikacích. Při srovnání se způsoby skladování současných hlavně využívaných paliv můžeme říci, že se jedná o velmi nákladný způsob úschovy paliva. Některé další parametry, včetně srovnání vůči benzínu jsou v následující tabulce.

Tabulka 3 - Srovnání vodíku s dalšími palivy [8]

Palivo (20 °C) druh/skupenství	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrný Objem [l/kg]	M.O. vzt. k benzínu	Výhřevnost [MJ/kg]	Hustota Energie [MJ/l]	H.E. vzt. k benzínu
Vodík 1 bar	0.084	11939	8354.7	119	0.01	0.0003
Vodík 250 bar	17	58.8	41.15	119	2.024	0.065
Vodík 350 bar	22.2	45.2	31.6	119	2.64	0.085
Vodík 700 bar	39	25.9	18.14	119	4.6	0.15
Vodík kapalný (-253 °C)	71.08	14.1	9.85	119	8.46	0.27
Propan kapalný	498	2	1.4	46.3	23.08	0.74
Benzín kapalný	700	1.43	1	44.5	31.15	1

### 6.5.1 Skladování v plynné fázi

Skladování v plynné formě je nejčastějším způsobem uschování vodíku pro palivové články. Tento způsob skladování vyžaduje zásobníky o velkých objemech a schopnostech odolat vysokým tlakům, protože vodík má nízkou hustotu energie. Vzhledem k jeho fyzikálním vlastnostem je komprese vodíku energeticky náročný proces. Náročnost procesu komprimace se odvíjí od fyzikálních vlastností vodíku, viz tabulka 4.



Obrázek 19 - Řez kompozitní láhví [8]

Tabulka 4 - Porovnání vybraných vlastností vodíku a metanu

		H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Hustota	[kg.mN <sup>-3</sup> ]	0,0887	0,707
V <sub>o</sub>	[m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> ]	11,11	1,39
Spálné teplo	[MJ.kg <sup>-1</sup> ]	142	55,6
	[MJ.mN <sup>-3</sup> ]	12,7	40

Vodík je vysoce hořlavá a nebezpečná směs, od toho se odvíjí bezpečnostní hlediska při skladování vysokotlakých láhví. Vodík bývá označován červeným pruhem. Pro statické jednotky se obvykle používá ocelových bezešvých lahví z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Povrch uvnitř kompozitních lahví bývá většinou potažen tenkou vrstvou kovu případně speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu. Vyrábějí se v objemech od několika litrů až do přibližně 50 l pro běžné aplikace. Provozní tlaky se pohybují okolo 350 bar v nejnovějších aplikacích potom v rozmezí 450 – 700 bar. Maximální hodnota tlaku, které lze dnes dosáhnout je 1000 bar.

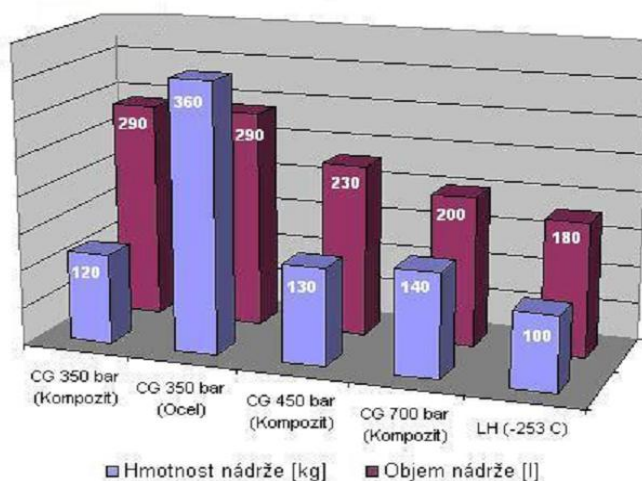
### 6.5.2 Skladování v kapalně fázi

Oproti fosilním palivům, které se skladují při běžných teplotách se tekutý vodík musí uchovávat při teplotě -253 °C, tím se samozřejmě zvyšují nároky na použitý materiál a energeticky náročný je také proces zkapalnění vodíku. Nádoby jsou konstrukčně uspořádány do více vrstev, které jsou od sebe velice dobře zaizolovány a jsou dimenzovány na maximální přetlak 5 barů. Vodík může být z nádoby odebírán jako kapalina pro spalovací motory nebo jako plyn pro palivové články. Nádoby nemůžou být nikdy dokonale zaizolovány a tak vlivem přestupu tepla z okolí dochází k vypařování a následnému zvyšování tlaku v nádobě. Proto jsou nádrže vybaveny pojistným ventilem. Tato technologie je spíše výhodná pro mobilní systémy. Výhodou tekutého vodíku je jeho vysoký energetický obsah, který je třikrát vyšší než u benzínu.

Tabulka 5 - Vybrané vlastnosti vodíku a jiných plynů

	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
Molová hmotnost	2,016	16,04	32,04	114,2
Bod varu [°C]	-252,77	-161,5	64,7	125,7
Bod tuhnutí [°C]	-259,2	-182,5	-98,8	-56,8
hustota kapalné fáze [kg.m <sup>-3</sup> ]	77	425	786	702

Na následujícím obrázku jsou naznačeny hmotnostní a objemové parametry pro plnou nádrž, která je schopna pojmout 6 kg H<sub>2</sub>, což je hmotnost zajišťující osobnímu vozu střední třídy dojezd přibližně 500 km. (ekvivalentní benzinová nádrž cca 55 kg, 45 l)



Obrázek 20. Hmotnostní a objemové parametry jednotlivých nádrží [8]

## 7 Shrnutí palivových článků

### Klady:

- Nabízejí větší účinnost přeměny energie chemické na elektrickou, než klasické spalovací jednotky.
- Nižší emise ( $\text{NO}_x$  a  $\text{SO}_2$  a další škodlivé plyny jsou zanedbatelné ve srovnání s klasickým spalováním).
- Z mechanického hlediska se jedná o jednoduchou výrobu (min. hluková zátěž, bez rotačních součástí, ...).

### Zápory:

- Materiálová náročnost
- Dosažitelnost a dostupnost palivových plynů. (Auta – infrastruktura čerpacích stanic)
- Náchylnost palivových článků na čistotu plynů.
- Elektrochemické děje => degradace systémů (zanášení, koroze).

Technologie palivových článků nabízí mnoho výhod oproti technologiím přímého spalování fosilních paliv. Pro využití ve větším měřítku tomu zatím brání technologická ale v dnešní době především finanční náročnost.

V procesu prosazování této technologie budou hrát roli především:

- Vyčerpání primárních energetických surovin.
- Neúnosná mez emisí škodlivých plynů ze spalovacích procesů, energetických zdrojů, z dopravních prostředků a jejich snižování.
- Možnost napájení menších elektrických spotřebičů (např. notebooky, ...)

## 7 Výpočet tepelné ztráty budovy

Literatura: [19, 20]

Pro použití palivového článku typu SOFC jako zdroj tepla jsem si vybral jednopodlažní rodinný dům (4+2) s přiloženou výkresovou dokumentací viz příloha. Tento rodinný dům se nachází na okrajové části města Opavy v zastavěné oblasti. Rodinný dům obývá 5 lidí, 2 dospělí a 3 děti se standardními životními nároky. Při výběru stavby, výpočtu tepelných ztrát a návrhu otopné soustavy jsem přihlížel, aby byla zajištěná co nejlepší tepelná pohoda člověka.

Tepelná pohoda je jakýsi stav člověka, při kterém se cítí nejlépe, ať už se jedná o domácí prostředí nebo pobyt na pracovišti. To zahrnuje například zajištění optimálního tepelného stavu interiéru – tepelné pohody.

Při výpočtu tepelné ztráty budovy jsem vycházel z doporučeného postupu a výběru hodnot podle normy **ČSN 06 0210** a **ČSN 73 0540-3**.

Výpočtová metoda je založena na těchto předpokladech:

- rozložení teplot (teplota vzduchu a operativní teplota) je rovnoměrné
- tepelné ztráty jsou vypočítané pro podmínky ustáleného stavu za předpokladu konstantních vlastností, například teplot, charakteristik stavebních konstrukcí atd.

Údaje zjištěné z výkresové dokumentace:

- Základní údaje o kapacitě stavby

Počet bytových jednotek	1
Obytná plocha	78,12 m <sup>2</sup>
Užitková plocha	90,32 m <sup>2</sup>
Zastavěná plocha	72,10 m <sup>2</sup>

- Umístění stavby a její orientace (polohopisný plán)



- Stavba domu (počet, druh a umístění místností a jejich rozměry)
- Údaje o použitých materiálech a jejich tloušťkách (zbytek vhodně zvolen podle normy [19, 20])

Pro stanovení tepelné ztráty je v následujícím výpočtu použito obálkové metody tj. stanovení pouze tepelné ztráty obvodového pláště.

## 7.2 Postup výpočtu

### 7.2.1 Tepelná ztráta prostupem tepla

Doporučené hodnoty pro výpočet odečtené z normy (ČSN 06 0210 a ČSN 73 0540-3). U hodnot odečtených z jiných zdrojů je uveden odkaz na literaturu.

Tabulka 5 – Výpočtové hodnoty

Výpočtová venkovní teplota	$t_e$	-15	°C
nevytápěné místnosti	$t_{ie}$	-6	°C
stavební konstrukce přilehající k zemině	$t_{gr}$	10	°C
součinitel přestupu tepla (vnější)	$\alpha_1$	20	$W.m^{-2}.K^{-1}$
součinitel přestupu tepla (vnitřní)	$\alpha_2$	8	$W.m^{-2}.K^{-2}$

$t_e$  - hodnota pro lokalitu Opava

$t_{ie}$  - podstřešné prostory, půdy - těsná krytina bez tepelné izolace

$t_{gr}$  - dané normou pro nepodsklepené podlahy přízemních místností

Tabulka 6 - Výpočtová vnitřní teplota

č. místnosti	místnost	$t_i$ [°C]	plocha [m <sup>2</sup> ]
1,01	zádveří	15	3,96
1,02	WC	20	1,14
1,03	koupelna + WC	24	6,21
1,04	tech. místnost	15	10,00
1,05	ložnice	20	14,25
1,06	chotba	15	6,67
1,07	pokoj	20	13,30
1,08	terasa	-	-
1,09	obývací pokoj	20	25,36
1,10	kuchyň	20	7,63
1,11	sklad potravin	15	2,20

Hodnoty pro obytné budovy trvalé užívané

Tabulka 7 - Složení konstrukcí

<b>složení podlahy:</b>			
	<b>materiál</b>	<b>d</b> [m]	<b><math>\lambda</math></b> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
1	dřevotříska	0,03	0,11
2	beton ze struskové pemzy	0,04	0,6
3	PPS (pěnový polystyrén)	0,2	0,037
4	folie PVC	0,0001	0,2
5	podkladní beton	0,15	1,3
6	štěrkopískový podsip	0,2	0,65
<b>složení stropu:</b>			
	<b>materiál</b>	<b>d</b> [m]	<b><math>\lambda</math></b> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
1	pojistná hydroizolace (IPA 400SH)	0,001	0,2
2	PPS (pěnový polystyrén)	0,25	0,039

3	sadrokartonový strop	0,08	0,22
<b>složení stěny:</b>			
	<b>materiál</b>	<b>d [m]</b>	<b><math>\lambda</math> [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]</b>
1	vnitřní omítka vápenná	0,01	0,88
2	cihly HELUZ	0,5	0,16
3	vnější omítka perlitová	0,01	0,11

Cihly HELUZ hodnoty udává výrobce [14].

Tloušťky jednotlivých vrstev jsou vhodně zvoleny, aby odpovídaly tloušťkám jednotlivých stěn.

Tabulka 8 - Součinitele prostupu tepla: [15]

Okna	$k_{ok,p}$	1,2	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
Dveře vchodové	$k_{ok,p}$	1,7	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
Dveře balkonové	$k_{ok,p}$	1,2	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>

SVT4139 Eurookno IV 68 TWW

SVT4042 Vchodové dveře TWW

Balkonové dveře jsou celoprosklené => hodnoty jsou stejné jako u oken.

### Výpočet ploch:

Okna

typ	plocha [m <sup>2</sup> ]
A	2,25
B	1,8
C	0,25

#### Dveře

typ	plocha [m <sup>2</sup> ]
D	2,1
E	4,5

Typ A – okno o rozměrech 1500 x 1500 mm

Typ B – okno o rozměrech 1200 x 1500 mm

Typ C – okno o rozměrech 500 x 500 mm

Typ D – dveře o rozměrech 1000 x 2100 mm

Typ E – dveře o rozměrech 2000 x 2250 mm

Tabulka 9 - Plochy podlah (stropů) a zdí bez oken

Označení stěny		podlaha	stěna bez oken
místnost	světová str.	plocha [m <sup>2</sup> ]	plocha [m <sup>2</sup> ]
1,01	V	3,96	2,85
1,02	V	1,14	2,3625
1,03	V	6,21	4,5625
1,04	V	10,00	6,625
1,04	S	10,00	8,6175
1,05	S	14,25	10,45
1,05	Z	14,25	8,0625
1,07	Z	13,30	7,375
1,09	Z	25,36	7,7375
1,09 + 1,10	J	32,99	19,75
1,10	V	7,63	7,4125
1,11	V	2,20	2,5

Při výpočtu ploch byly uvažovány vnitřní rozměry místností.

Hodnoty přírážek na světovou stranu

S	0,1
J	-0,05
V	0,05
Z	0

**Tabulka výsledných hodnot:**

Tabulka 10 - Hustoty tepelných toků

PODLAHA		STROP		STĚNA	
Teplota v místnosti [°C]	q [W.m <sup>-2</sup> ]	Teplota v místnosti [°C]	q [W.m <sup>-2</sup> ]	Teplota v místnosti [°C]	q [W.m <sup>-2</sup> ]
15	0,81	15	3,10	15	8,82
20	1,62	20	3,84	20	10,29
24	2,27	24	4,43	24	11,46

Základní tepelná ztráta prostupem tepla

Tabulka 11 - Stěna

označení stěny			Okna:		Dveře:			
		$Q_0$ [W]	typ	$Q_0$ [W]	Typ	$Q_0$ [W]		$k_c$ [-]
1,01	V	25,13			D	107,10		0,294
1,02	V	24,30	C	10,50				0,294
1,03	V	52,30	C	11,70				0,328
1,04	V	58,42	C	9,00				0,294
1,04	S	75,99			D	107,10		0,294
1,05	S	107,50						0,294
1,05	Z	82,94	A	94,50				0,294
1,07	Z	75,87	A	94,50				0,294
1,09	Z	79,60			E	189,00		0,294
1,09 + 1,10	J	203,17	A	94,50				0,294
1,10	V	76,25	B	75,60				0,294
1,11	V	22,04	C	9,00				0,294
<b>suma</b>		<b>883,52</b>		<b>399,30</b>		<b>403,20</b>	<b>Průměr</b>	<b>0,297</b>

Celkem  $Q_0 = 1686,02$  W (součet tepelných ztrát stěn, oken a dveří)

Tabulka 12 - Strop

označení stěny	$Q_0$ [W]		$k_c$ [-]
1,01	12,27		0,148
1,02	4,37		0,148
1,03	27,48		0,148
1,04	30,98		0,148
1,05	54,65		0,148
1,06	20,66		0,148
1,07	51,01		0,148
1,08	-		-
1,09	97,27		0,148
1,10	29,26		0,148
1,11	6,82		0,148
<b>suma</b>	<b>334,78</b>	<b>Průměr</b>	<b>0,148</b>

Tabulka 13 - Podlaha

označení stěny	$Q_0$ [W]		$k_c$ [-]
1,01	3,21		0,162
1,02	1,85		0,162
1,03	14,09		0,162
1,04	8,11		0,162
1,05	23,10		0,162
1,06	5,41		0,162
1,07	21,56		0,162
1,08	-		-
1,09	41,11		0,162
1,10	12,37		0,162
1,11	1,78		0,162
<b>suma</b>	<b>132,59</b>	<b>Průměr</b>	<b>0,162</b>

Výška místnosti

$$h = 2,75 \text{ m}$$

Tabulka 14 - Tepelná ztráta prostupem tepla

<b>Stěny:</b>	
<b>světová str.</b>	$Q_p$ [W]
S	328,46
J	291,82
V	520,01
Z	635,10
<b>Strop:</b>	
	$Q_p$ [W]
	344,93
<b>Podlaha:</b>	
	$Q_p$ [W]
	136,61

Celkem  $Q_p = 2256,92 \text{ W}$

### Příklady výpočtu:

Ukázka obsahuje výpočet severní strany stěny, počítané jsou, ale jen hodnoty pro jednu stěnu zbytek jsou hodnoty odečtené z již vypočítané tabulky.

Tepelná ztráta místnosti prostupem tepla  $Q_p$  [W], se určí podle vztahu

Pouze pro stěnu s označením „1.04 S“

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_0 \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3) = 75,985 \cdot (1 + 0,044 + 0,1) = 89,93 \text{ W} \quad (21)$$

$\dot{Q}_0$  základní tepelná ztráta prostupem tepla

$p_1$  přírážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí

$p_2$  přírážka na urychlení zátoku (uvažuje se jen v případech kde nelze zajistit nepřerušovaný provoz vytápění, proto s ní nepočítám)

$p_3$  přírážka na světovou stranu

Základní tepelná ztráta prostupem tepla

$$\dot{Q}_0 = \sum_{j=1}^{j=n} q \cdot S_j = 8,8176 \cdot 8,6175 = 75,985 \approx 76 \text{ W} \quad (22)$$

$S_j$  ochlazovaná část stavební konstrukce [ $\text{m}^2$ ]

$q$  hustota tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

Výpočet plochy stěny „1.04 S“

$$S_c = S_s - S_D = 4050 \cdot 2750 - 2100 \cdot 1200 = 8617500 \text{ mm}^2 = 8,6175 \text{ m}^2 \quad (23)$$

$S_s$  plocha stěny [ $\text{m}^2$ ]

$S_D$  plocha dveří [ $\text{m}^2$ ]

Hustota tepelného toku rovinné stěny

Stěna s označením „1.04 S“

Složení stěny v tabulce xxx.



$$q = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{ej}}} = \frac{15 - (-15)}{\frac{1}{8} + \frac{0,01}{0,88} + \frac{0,5}{0,16} + \frac{0,01}{0,11} + \frac{1}{20}} = 8,8176 \doteq 8,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (24)$$

$t_i$  výpočtová vnitřní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_e$  výpočtová teplota prostředí na vnější straně konstrukce [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha_i, \alpha_{ej}$  součinitele přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$l_i, d$  tloušťka jednotlivých vrstev materiálu [m]

$\lambda_i$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

Přirážka na vyrovnávání vlivu chladných konstrukcí  $p_1$ , závisí na průměrném součiniteli prostupu tepla všech konstrukcí  $k_c$ , který se stanoví ze vztahu

Stěna s označením „1.04 S“

$$k_c = \frac{\dot{Q}_0}{\sum S_s \cdot (t_i - t_e)} = \frac{75,985}{8,6175 \cdot (15 - (-15))} = 0,294 \text{ } \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (25)$$

$S_s$  celková plocha všech konstrukcí ohraničující vytápěnou místnost [ $\text{m}^2$ ]

$t_e$  výpočtová venkovní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$p_1$  se potom stanoví ze vztahu:

$$p_1 = 0,15 \cdot k_c = 0,15 \cdot 0,294 = 0,044 \text{ } \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (26)$$

Hodnota se vztahuje, pouze pro konkrétní stěnu. Pro celkový výpočet musíme použít aritmetický průměr všech  $k_c$ .

Přirážka na světovou stranu. O její hodnotě rozhoduje poloha nejvíce ochlazované stavební konstrukce. Viz ČSN 06 0210 tab. A8.

$p_3 = 0,1$  pro severní stranu

### 7.2.2 Tepelná ztráta větráním

Rozlišujeme 2 způsoby výměny vzduchu.

Nucené větrání, které musí vycházet z hygienických nebo technologických požadavků (např. při řešení odvlhčování nebo odvodu škodlivin. Požadavky jsou dány intenzitou potřeby výměny vzduchu  $n_h$  [ $h^{-1}$ ]).

Přirozené větrání infiltrací, která je způsobena netěsnostmi (spárová provzdušnost) u oken a dveří.

Doporučené hodnoty pro výpočet odečtené z normy (ČSN 06 0210 a ČSN 73 0540-3). U hodnot odečtených z jiných zdrojů je uveden odkaz na literaturu.

Tabulka 15 - Součinitel spárové provzdušnosti  $i_{LV}$  [11]

typ	$i_{LV}$ [ $m^3/(s.m.Pa^{0,67})$ ]
Okna	$0,013 \times 10^{-4}$
Dveře (vchodové)	$0,24 \times 10^{-4}$
Dveře (balkonové)	$0,013 \times 10^{-4}$

Tabulka 16 - Vnitřní objem místností

č. místnosti	Objem $V_m$ [ $m^3$ ]
1,01	10,89
1,02	3,135
1,03	17,0775
1,04	27,5
1,05	39,1875
1,06	18,3425
1,07	36,575
1,08	-
1,09	69,74
1,10	20,9825
1,11	6,05

Tabulka 17 - Délka spár u oken a dveří

typ	L [m]	
A	9	se sloupkem uprostřed
B	5,4	bez sloupku
C	2	bez sloupku
D	6,2	dveře
E	10,75	bez sloupku uprostřed, s otevíráním uprostřed

Tabulka 18 - Charakteristické číslo místnosti a součin ( $i_{LV} \times L$ )

Místnost	součin ( $i_{LV} \times L$ )	M
1,01+1,06	0,000149	0,7
1,04	0,000151	0,7
1,05	0,000012	1
1,07	0,000012	1
1,09+1,10	0,000033	0,7
1,11	0,000003	1

Pro výpočet bereme z normy dveře těsné s prahy.

M Charakteristické číslo místnosti

M 0,7 - provzdušnost vnitřních dveří je větší než provzdušnost oken

M 1 - pro místnost bez dveří se volí  $M = 1$

Charakteristické číslo budovy

$$B = 6 \text{ Pa}^{0,67}$$

Normální krajina, nechráněná

Rychlost větru  $w_v = 6 \text{ m.s}^{-1}$

## Nucené větrání

Pro nucené větrání jsem se rozhodl u místností s hygienickým zařízením. Dům je navrhován pro 5 osob, proto uvažuji výměnu vzduchu 5x za 24 hodin u místnosti 1.02 a 10x za 24 hodin u místnosti 1.03.

Intenzita výměny vzduchu:

$$n_{h1,02} = 0,208 \text{ h}^{-1}$$

$$n_{h1,03} = 0,417 \text{ h}^{-1}$$

Tabulka 19 – Nucené větrání

místnost	$V_{vH} [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	$Q_v [\text{W}]$
1,02	0,000181	8,255
1,03	0,001977	100,212

Suma  $Q_v = 108,466 \text{ W}$  tepelných ztrát při nuceném větrání

## Přirozené větrání infiltrací

Tabulka 20 - Přirozené větrání

Místnost	$V_{vP} [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	$Q_v [\text{W}]$
1,01+1,06	0,000625	24,373
1,04	0,000636	24,799
1,05	0,000070	3,194
1,07	0,000070	3,194
1,09+1,10	0,000137	6,248
1,11	0,000016	0,608

Suma  $Q_v = 62,417 \text{ W}$  tepelných ztrát při přirozeném větrání

Celkem  $Q_v = 170,884 \text{ W}$  Tepelných ztrát větráním

Místnost 1.04 (technická místnost) nemusí být nuceně větrána kvůli spalovacímu procesu. Přívod vzduchu pro spalování je zabudován do komína, takže se přivádí venkovní vzduch.

### Příklady výpočtu:

Tepelná ztráta prostoru (místnosti) větráním  $Q_v$  [W], se stanoví ze vztahu

$$\dot{Q}_v = 1300 \cdot \dot{V}_v \cdot (t_i - t_e) \quad (27)$$

$\dot{V}_v$  objemový tok větracího vzduchu [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ], za  $\dot{V}_v$  se dosadí větší z hodnot  $\dot{V}_{vH}$  a  $\dot{V}_{vP}$

$c_v$  objemová tepelná kapacita vzduchu při teplotě  $0^\circ C$  tj. přibližně při střední teplotě,  $c_v = 1300 [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$

Nucené větrání

Místnost s označením 1.03

$$\dot{V}_{vH} = \frac{n_h}{3600} \cdot V_m = \frac{0,417}{3600} \cdot 17,0775 = 0,00198 m^3 \cdot h^{-1} \quad (28)$$

$n_h$  intenzita výměny vzduchu [ $h^{-1}$ ]

$V_m$  vnitřní objem prostoru (místnosti) [ $m^3$ ]

$$\dot{Q}_v = 1300 \cdot \dot{V}_v \cdot (t_i - t_e) = 1300 \cdot 0,00198 \cdot (24 - (-15)) = 100,386 W \quad (29)$$

Intenzita výměny vzduchu

Vycházím z předpokladu, že každý obyvatel domu použije 2x hygienické zařízení v místnosti 1.03 (koupelna s WC).

$$n_{h1,03} = \frac{10}{24} = 0,417 h^{-1} \quad (30)$$

Vnitřní objem místnosti

$$V_m = (1,35 \cdot 1,75 + 1,35 \cdot 2,85) \cdot 2,75 = 17,0775 m^3 \quad (31)$$

Přirozené větrání infiltrací

Pro místnost 1.05

$$\dot{V}_{vP} = \sum (i_{LV} \cdot L) \cdot B \cdot M = 0,000012 \cdot 1 \cdot 6 = 7,5 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot h^{-1} \quad (32)$$

L      délka spár otevíraných částí oken a dveří [m]

$i_{LV}$       součinitel spárové provzdušnosti [ $m^3 \cdot s^{-1} / m \cdot Pa^{0.67}$ ]

B      charakteristické číslo budovy [ $Pa^{0.67}$ ]

M      charakteristické číslo místnosti [-]

### 7.2.3 Celková tepelná ztráta celého objektu

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_p + \dot{Q}_v - \dot{Q}_z = 2256,9 + 170,9 = 2427,8 W \doteq 2,429 kW \quad (33)$$

Tento výpočet tepelných ztrát je koncipován pro nejhorší možnou variantu. Nezahrnují se zde tepelnými zisky. To znamená, že se pro určení potřeby výkonu zdroje na vytápění počítá s největšími ztrátami.

## 8 Výkon kotle

Určení maximálního potřebného výkonu kotle (palivového článku) vychází z potřeby pokrytí tepelné ztráty budovy  $Q_c$  a nároků na ohřev teplé užitkové vody (dále jen TUV).

Při určení potřeby tepla pro TUV musíme vzít v úvahu průměrnou spotřebu teplé vody pro člověka na jeden den, která činí 80 litrů. Dále je důležitým parametrem doba ohřevu. To znamená, za jak dlouho dokáže kotel znovu nahřát odčerpaný objem teplé vody. Určujícím prvkem pro výpočet je ohřívání objemu, který jsem zvolil 80 litrů, jenž se musí ohřát z 10 °C na 55 °C (doporučené hodnoty) za dobu 30 minut.

$$P_{TUV} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t = \frac{V_v}{t_o} \cdot c_p \cdot (t_t - t_s) = \frac{80}{1800} \cdot 4186,8 \cdot (55 - 10) = 8373,6 W \quad (34)$$

$P_{TUV}$	potřebný výkon pro ohřev TUV [W]
$\dot{m}$	hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$V_v$	množství ohřívání vody [l]
$t_o$	doba ohřevu
$c_p$	měrná tepelná kapacita vody [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$t_i$	teplota vody na výstupu
$t_s$	teplota studené vody [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$$P_{PC} = Q_c + P_{TUV} = 2,429 + 8,374 = 10,8 \text{ kW} \quad (35)$$

$P_{PC}$  navrhovaný minimální výkon zdroje [W]

Požadavky na výkon zdroje 12kW a vyšší. Maximální výkon palivového článku je 2+20 kW, takže splňuje požadavky na výkon zdroje pro navrhovanou domácnost.

## 9 Otopná soustava

Literatura: [1, 13, 14]

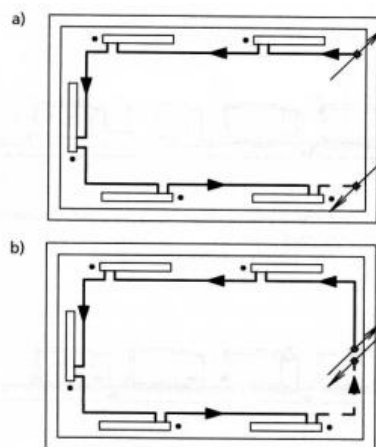
Otopná soustava je část tepelné soustavy, která je určena k vytápění prostřednictvím rozvodů (potrubní sítě) a otopných těles (radiátorů). Teplo je přenášeno teplotonosnou látkou od zdroje, přes dopravní potrubí k otopným tělesům. Nejčastěji používanou teplotonosnou látkou je voda vzhledem k její dostupnosti a fyzikálním vlastnostem.

### Druhy propojení otopných těles:

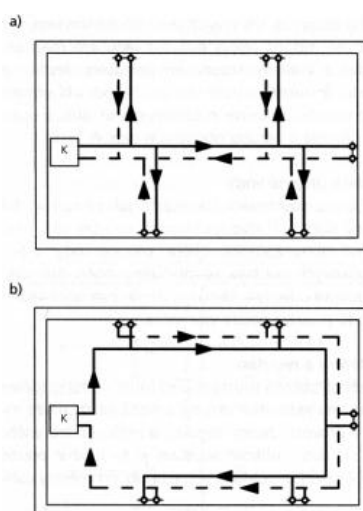
Dvoutrubkové soustavy

Dvoutrubkové soustavy patří k nejpoužívanějším vzhledem ke svojí provozní spolehlivosti a hydraulické a tepelné stabilitě. Otopná tělesa jsou navzájem paralelně

propojena, viz obrázek 22. Můžeme jasně rozlišit přívodní a vratné potrubí. Dále dělíme zapojení souproudé a protiproudé.



Obrázek 23 - Uzavřený a otevřený okruh jednohubkové soustavy [1]



Obrázek 24 - Protiproudé a souproudé zapojení dvoutrubkové otopné soustavy [1]

### Jednohubkové soustavy

V jednohubkové soustavě jsou tělesa propojena sériově viz obr.č.xxx. Otopná voda postupně protéká jednotlivě zapojenými otopnými tělesy, její teplota klesá, mění se i jednotlivé měrné výkony otopných těles. Proto se u tohohle zapojení přepočítávají velikosti otopných těles podle skutečných teplot otopné vody.



## Teplota otopné vody:

Teplota na výstupu z kotle je zároveň nejvyšší teplotou v otopném systému. Volí se v závislosti na otopném tělese, možností zdroje a druhu expanzní nádoby. Rozlišujeme:

- teplovodní nízkoteplotní  $t_1 \leq 65\text{ °C}$
- teplovodní otevřené  $65\text{ °C} < t_1 \leq 95\text{ °C}$
- teplovodní uzavřené  $65\text{ °C} < t_1 \leq 115\text{ °C}$
- horkovodní  $t_1 \geq 115\text{ °C}$

Teplotní spády se u nízkoteplotních a teplovodních soustav volí v rozmezí 10 až 25 K. Obvyklé teplotní spady u teplovodních soustav jsou 90/70 °C, 85/75 °C, 80/60 °C, 75/65 °C, 70/50 °C, 70/60 °C. U nízkoteplotních soustav jsou teplotní spády 55/45 °C, 45/35 °C, 35/25 °C.

Oběh otopné vody:

U obou soustav lze použít nucený nebo přirozený oběh vody. U dvourubkové soustavy se používají obě varianty u jednohubkové jen nucený oběh, kvůli vyšším hydraulickým ztrátám.

Výhody nuceného oběhu:

- menší světlost trubek
- možnost volby vyšší rychlosti proudění
- tlakové ztráty lze překonat dopravním tlakem čerpadla
- snížení nákladů na materiál
- možnost umístění otopných těles pod zdroj tepla

Nevýhody nuceného oběhu:

- závislost na elektrickém proudu
- možný hluk
- soustava je z provozního hlediska nákladnější

### **Materiál rozvodů:**

Základní používané materiály jsou kovy (oceli, mědi) a plasty, každé mají různé mechanické vlastnosti.

Ocel – je nejčastěji používaným materiálem na potrubí. Používá se ocel třídy 11.353.0 a po celé délce musí mít ochranný nátěr.

Měď – mají všechny přednosti mechanických vlastností ocelových trubek, ale zároveň menší tloušťku stěny tzn. i menší vnější průměr. Nedají se ovšem kombinovat s hliníkovými otopnými tělesy, kvůli možné elektrochemické korozi.

Plast – Na rozdíl od kovových materiálů je nutné na větší vzdálenosti použít více podpůrných zařízení (menší pevnost), také mají větší délkové teplotní roztažnosti.

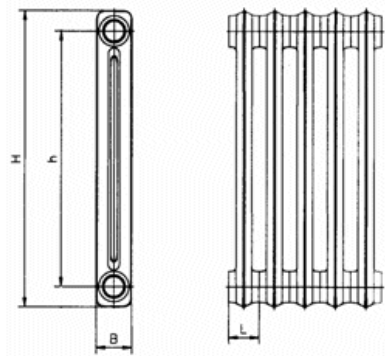
### **Otopná tělesa:**

Otopnými tělesy se teplo přiváděné kapalinou přenáší do prostoru (místnosti) v takovém množství aby byl zajištěna co nejlepší tepelná pohoda.

Druhy otopných těles:

Článeková otopná tělesa

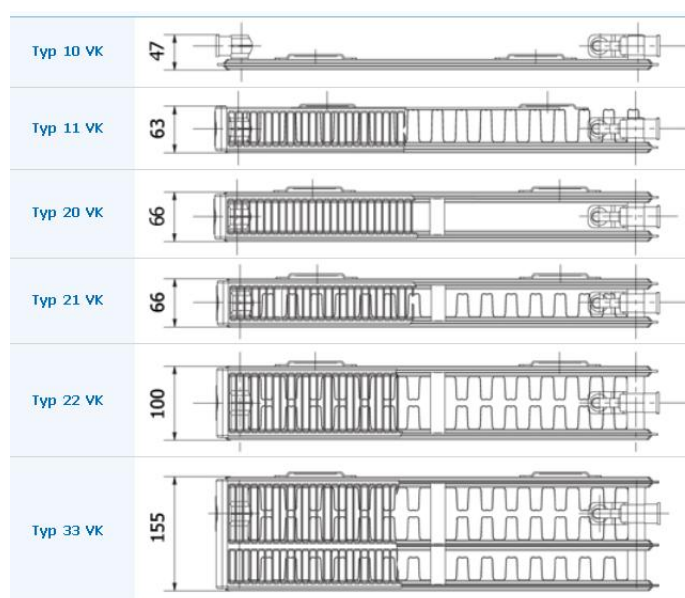
Jsou složena z jednotlivých článků, viz obr xxx. Materiálem může být ocelový plech, litina a slitiny hliníku. Výhodou těchto těles je, že mají vnější teplotněměrnou plochu rozloženou převážně do hloubky, kvůli zvětšení tepelného modulu.



Obrázek 25 - Litinové článkové otopné těleso [1]

Desková otopná tělesa:

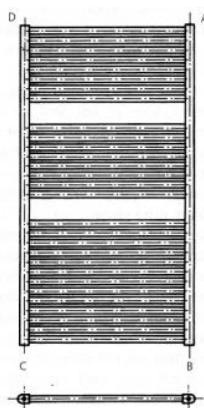
Patří dnes k nejčastěji používaným. Jsou to souvislé desky s povrchem zvětšeným zvlněním s různým uspořádáním např. obr xxx. Deska se skládá ze dvou plechů s prolisky (kanálky) spojené dohromady. Cíl vývoje směřuje k tomu, aby se vyrovnaly svým tepelným modulem článkovým otopným tělesům.



Obrázek 26 - Příklady deskových otopných těles [13]

Trubková otopná tělesa:

U trubkových těles jsou rozvodné a sběrné komory navzájem propojené řadou trubek různých tvarů průřezu. Tato otopná tělesa jsou vhodná především do koupelen jednak kvůli vytápění, ale třeba i k sušení textilií. Ve většině případů bývají tato otopná tělesa vybavené přídatným elektrickým otopným tělesem. Je to praktické především z důvodu, že v letním období může topit nezávisle na zdroji vytápění.



Obrázek 27 - Trubkové otopné těleso [14]

Konvertory:

Je to druh otopného tělesa, který je založený na sdílení tepla do prostoru převážně konvekci. Skládá se z výměníku tepla a skříně, která má v horní části mřížku pro proudění vzduchu.

## 9.1 Návrh otopné soustavy

Při návrhu budu vycházet ze zvoleného teplotního spádu 75/65 °C. Jako první navrhnu profil potrubí, který určíme z hmotnostního průtoku:

$$\dot{m} = \frac{Q_c}{c_p \cdot \Delta t} = \frac{2428}{4186,8 \cdot (75 - 65)} = 0,058 \doteq 0,06 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 216 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (36)$$

$\Delta t$  jmenovitý teplotní rozdíl [K]

$Q_c$  přenášený tepelný výkon (tepelná ztráta domu) [W]

Výběr optimální rychlosti v potrubí podle tabulky 21.

Tabulka 21 - Rozsah optimálních rychlostí teplotnosné pracovní látky v potrubí [4]

Teplotnosná látka	Rozsah $w$ (m.s <sup>-1</sup> ) (max)	Průměrná $w$ (m.s <sup>-1</sup> )
Teplovodní soustava s přirozeným oběhem vody	0,05 až 0,3 (1,0)	0,2
Teplovodní soustava s nuceným oběhem vody	0,2 až 1,0 (3,0)	0,6
Dálkové horkovodní rozvody	1,0 až 4,0	1,5

Pro teplovodní soustavu s nuceným oběhem vody je  $w = 0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Výpočet průměru potrubí:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot w \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,06}{\pi \cdot 0,6 \cdot 1000}} = 0,0113 \text{ m} = 11,3 \text{ mm} \quad (37)$$

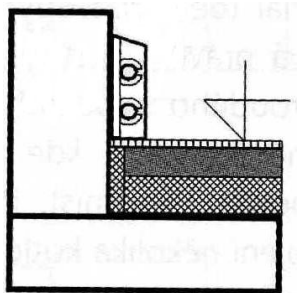
$d$  průměr potrubí [m]

$w$  průměrná rychlost v potrubí [m.s<sup>-1</sup>]

$\rho$  hustota vody [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>]

Dle tabulky, viz [12], volím materiál měď Ø 15x1 (DN 15) s drsností potrubí  $k = 0,02 \text{ mm}$ , rychlost proudění kapaliny  $w = 0,471 \text{ m.s}^{-1} \Rightarrow$  splňuje hodnotu dle tabulky 21, a měrné tlakové ztráty  $R = 253,8 \text{ Pa.m}^{-1}$  na jeden metr potrubí.

Z estetického i bezpečnostního hlediska může být potrubí vedeno v liště, viz obrázek níže.



Obrázek 28 - řez vedení potrubí v liště [1]

### 9.1.1 Návrh otopných těles:

Všechny obrázky uvedené v této kapitole jsou ze zdroje [13, 14] (obrázek 29)

Při návrhu otopného tělesa vycházím z předpokladu, že musí pokrýt tepelnou ztrátu dané místnosti. Pro místnost 1.04 bude zdrojem tepla spalovací zařízení. Místnost 1.06 bude vytápěna okolními místnostmi vzhledem ke svým nízkým ztrátám. Délka otopných těles je navrhována vzhledem k šíři okna, kvůli zamezení klesání chladného vzduchu z oken k podlaze, což by mohlo zapříčinit lokální tepelnou nepohodu. Hodnota místních ztrát, viz příloha 1.

Místnost 1.05

Tepelná ztráta místnosti  $Q_{1.05} = 305 \text{ W}$

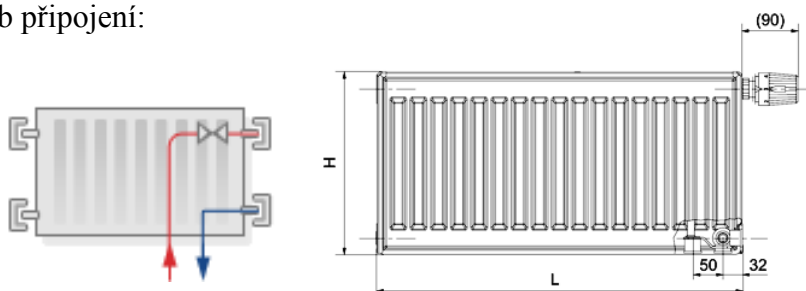
Teplota místnosti  $t_{1.05} = 20 \text{ °C}$

Desková otopná tělesa RADIK, typ 10 VK

# Technické údaje:

Výška	500 mm
Šířka	1600 mm
Hloubka typ 10 VK	47 mm
Připojovací rozteč	50 mm
Připojovací závit	6 x G $\frac{1}{2}$ vnitřní
Objem	4,32 l
Nejvyšší přípustný provozní přetlak	1 MPa
Nejvyšší přípustná provozní teplota	110 °C
Připojení otopného tělesa	pravé spodní
Tepelný výkon tělesa	822 W
Místí ztráty $\xi$ [-]	8,5 (1 deska, DN 15)

## Způsob připojení:



## Schéma typ 10 VK



## Místnost 1.07

Tahle místnost má velice podobné parametry a ještě menší tepelnou ztrátu proto typ otopného tělesa volím stejný, jako v místnosti 1.05 tzn. RADIK typ 10 VK.

Místnost 1.09 + 1.10

Tepelná ztráta místnosti  $Q_{1.09+1.10} = 729 \text{ W}$

Teplota místnosti  $t_{1.09+1.10} = 20 \text{ °C}$

Desková otopná tělesa RADIK, typ 20 VK

Technické údaje:

Výška	500 mm
Šířka	1600 mm
Hloubka typ 20 VK	66 mm
Připojovací rozteč	50 mm
Připojovací závit	6 x G½ vnitřní
Objem	8,16 l
Nejvyšší přípustný provozní přetlak	1 MPa
Nejvyšší přípustná provozní teplota	110 °C
Připojení otopného tělesa	pravé spodní
Tepelný výkon tělesa	1341 W
Místí ztráty $\xi$ [-]	19 (2 deska, DN 15)

Způsob připojení:

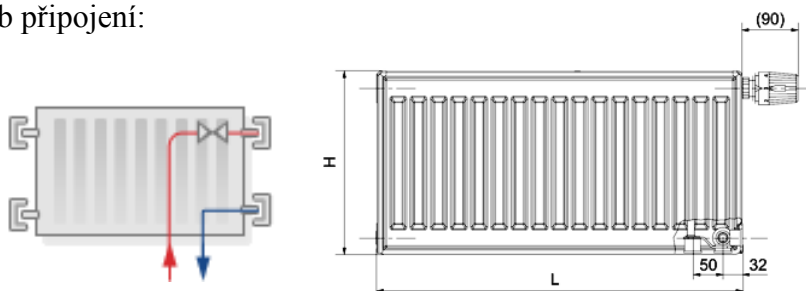
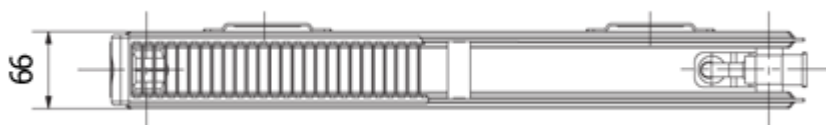


Schéma typ 20 VK



## Místnost 1.02

Tepelná ztráta místnosti  $Q_{1.02} = 45 \text{ W}$

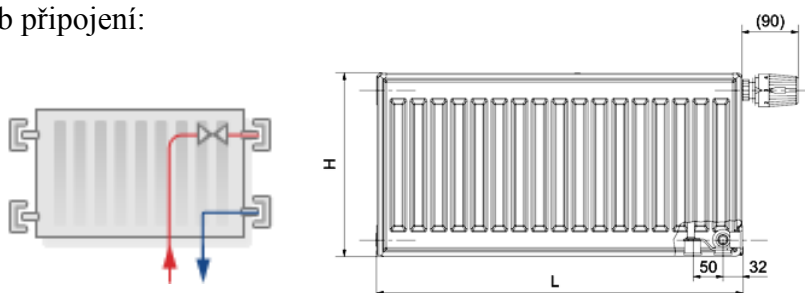
Teplota místnosti  $t_{1.02} = 20 \text{ °C}$

Desková otopná tělesa RADIK, typ 10 VK

### Technické údaje:

Výška	500 mm
Šířka	500 mm
Hloubka typ 10 VK	66 mm
Připojovací rozteč	50 mm
Připojovací závit	6 x G $\frac{1}{2}$ vnitřní
Objem	1,35 l
Nejvyšší přípustný provozní přetlak	1 MPa
Nejvyšší přípustná provozní teplota	110 °C
Připojení otopného tělesa	pravé spodní
Tepelný výkon tělesa	291 W
Místí ztráty $\xi$ [-]	8,5 (1 deska, DN 15)

### Způsob připojení:



### Schéma typ 20 VK





### Místnost 1.01

V této místnosti bude použito otopné zařízení se stejnými parametry jako v místnosti 1.02. Otopné těleso je dimenzováno tak aby zvládlo vytopit i místnost 1.06.

Tepelná ztráta místnosti  $Q_{1.02} = 158 \text{ W}$

Teplota místnosti  $t_{1.02} = 20 \text{ °C}$

Desková otopná tělesa RADIK, typ 10 VK

### Místnost 1.03

Tepelná ztráta místnosti  $Q_{1.03} = 169 \text{ W}$

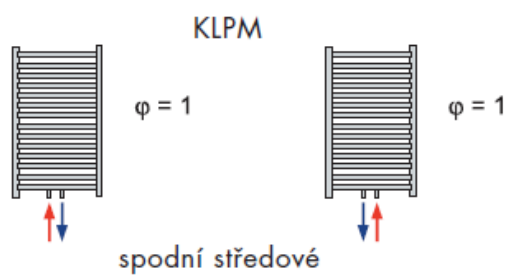
Teplota místnosti  $t_{1.03} = 24 \text{ °C}$

Trubková otopná tělesa KORALUX, provedení linear plus, typ KLPM 1204.600

### Technické údaje:

Výška	H	1204 mm
Šířka	L	600 mm
Hloubka		35 mm
Připojovací rozteč	h	550 mm
Připojovací závit		4 x G $\frac{1}{2}$ vnitřní
Objem		6,8 l
Nejvyšší přípustný provozní přetlak		1 MPa
Nejvyšší přípustná provozní teplota		110 °C
Připojení otopného tělesa		spodní středové
Tepelný výkon tělesa		605 W
Místí ztráty $\xi$ [-]		2,5 (DN 15)

Způsob připojení:



Způsob upevnění:

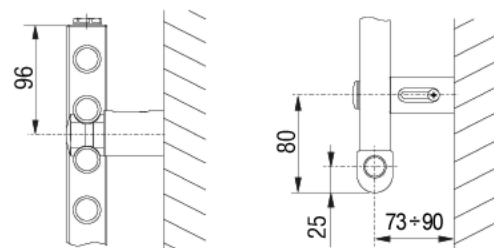
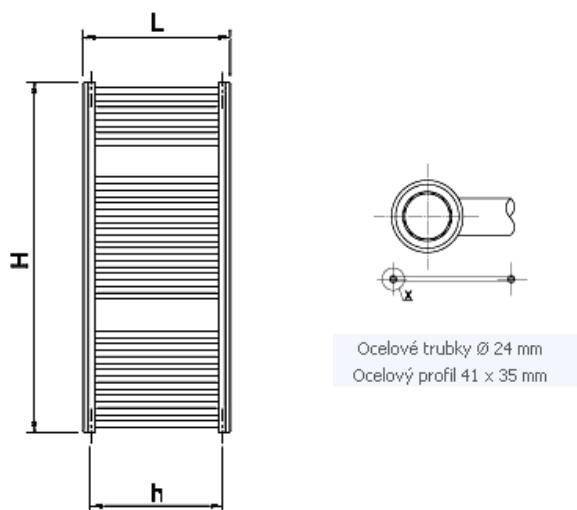


Schéma typ KLP 1204



## 10 Čerpadla

Literatura: [1, 15]

Čerpadla se v topenářském odvětví používají na vyvolání přetlaku potřebného překonání hydraulických odporů otopného systému. Při proudění teplotonosné látky vznikají tlakové ztráty působením tření a vřazenými nebo místními odpory (oblouky, odbočky, změny průřezu potrubí, kotle, otopná tělesa apod.) Nejrozšířenější teplotonosnou látkou je voda (do 110 °C), dále může obsahovat různé chemikálie nemrznoucí směsi apod.

V topenářské technice se převážně používají hydrodynamická čerpadla.

Čerpadla můžeme zapojit buď paralelně – tam, kde je potřeba velký hmotnostní průtok, při relativně malém dopravním tlaku. Tento způsob zapojení se používá u velkých otopných soustav. Nebo sériově – tam, kde je potřeba při malém hmotnostním průtoku vyvolat velký tlakový spád.

Nejčastěji používaný typ čerpadel jsou oběhová čerpadla viz obr xxx, která jsou umístěna přímo do potrubí. Každá odběrová soustava má vlastní čerpadlo (okruh vytápění, větrání, TUV a jiné technologie). Typ čerpadla a parametry se volí podle potřeb jednotlivých okruhů.

V tomto návrhu jsou 2 okruhy jeden na vytápění a jeden na ohřev TUV. Oba dva okruhy budou mít samostatné čerpadlo s redukcí na průměr trubek a uzavíracím ventilem viz příloha xxx(schéma kotelny).

Okruh, který určený pro vytápění je dále rozdělen na 2 větve, viz příloha xxx. Pravou větev, která směřuje do obytných místností (pokoje) a levou větev, která směřuje do místností s hygienickým zařízením. Při návrhu parametrů čerpadla se řídíme hodnotou tlaku, který je způsobený ztrátami v otopném systému. Protože se větve hned za spalovacím zařízením větví (paralelně), budeme navrhovat čerpadlo podle větve, na které je vyšší tlaková ztráta.

Čerpadlo bude umístěné v přívodním potrubí, viz příloha xxx. Bude sice vystaveno vyšším provozním teplotám, než kdyby bylo na vratném potrubí, ale tak v celé soustavě vznikne relativní přetlak, který zabraňuje vnikání vzduchu do otopné soustavy.

## 10.1 Návrh čerpadla

Hlavními parametry čerpadel jsou dopravní množství  $M$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ], dopravní tlak  $\Delta p_{\text{č}}$  [Pa], měrná energie  $Y$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] nebo dopravní výška  $H$  [m].

Dopravní tlak čerpadla:

$$\Delta p_{\text{č}} = \Delta p_{\text{tr}} + \Delta p_{\text{jo}} \quad [\text{Pa}] \quad (38)$$

$\Delta p_{\text{č}}$  dopravní tlak čerpadla [Pa]

$\Delta p_{\text{tr}}$  tlakové ztráty třením [Pa]

$\Delta p_{\text{jo}}$  tlakové ztráty vřazenými či místními odpory [Pa]

Tlaková ztráta třením:

$$\Delta p_{\text{tr}} = R \cdot l \quad [\text{Pa}] \quad (39)$$

$l$  délka potrubí [m]

$R$  měrná tlaková ztráta [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

Tlaková ztráta vřazenými či místními odpory:

$$\Delta p_{\text{jo}} = \xi \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (40)$$

$\xi$  součinitel vřazeného odporu [-]

$w$  rychlost proudění kapaliny v potrubí [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\rho$  hustota proudící kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Pravá větev:

Délka potrubí  $l = 38,6$  m

Včetně oblouku kolem dveří. Výška vedení nad dveřmi je 2,5 m.

$$\Delta p_{\text{tr}} = 253,8 \cdot 38,6 = 9796,68 \doteq 9797 \text{ Pa} \quad (41)$$

$$\Delta p_{\text{jo}} = 108,4 \cdot \frac{0,471^2 \cdot 1000}{2} = 12023,78 \doteq 12024 \text{ Pa} \quad (42)$$

Tabulka 22 - Tlakové ztráty vřazenými či místními odpory (pravá větev)

	kusů	$\xi$ [-]
počet kolen	34	2,0
kotel (ocelový)	1	2,0
deskové otopné těleso		
1 deska	2	8,5
2 desky	1	19,0
T-kus		
teplá větev	2	0,2
studená větev	2	1,0
<b>součet</b>		<b>108,4</b>

Hodnoty v tabulce viz příloha 1.

Celkové ztráty na pravé větvi

$$\Delta p_{\varepsilon} = 9797 + 12024 = 21821 Pa \quad (43)$$

Levá větev:

Délka potrubí  $l = 5,75$  m

$$\Delta p_{tr} = 253,8 \cdot 5,75 = 1459,35 \div 1460 Pa \quad (44)$$

$$\Delta p_{jo} = 42,2 \cdot \frac{0,471^2 \cdot 1000}{2} = 4680,85 \div 4681 Pa \quad (45)$$

Tabulka 23 - Tlakové ztráty vřazenými či místními odpory (levá větev)

	kusů	$\xi$ [-]
Počet kolen	8	2,0
kotel (ocelový)	1	2,0
deskové otopné těleso		
1 deska	2	8,5
otopný žebřík	1	2,5
T-kus (roh místnosti)		
teplá větev	1	2,0
studená větev	1	1,5
T-kus (otopné těleso)		
teplá větev	1	0,2
studená větev	1	1
<b>součet</b>		<b>42,2</b>

Hodnoty v tabulce viz příloha 1.

Celkové ztráty na levé větvi

$$\Delta p_{\varepsilon} = 1460 + 4681 = 6141 \text{ Pa} \quad (46)$$

Pro určení oběhového čerpadla bereme v úvahu pravou větev, kde jsou větší tlakové ztráty. Výběr správného oběhového čerpadla provedeme pomocí grafu charakteristiky čerpadla a potrubní sítě viz obr xxx. Do grafu zaneseme objemový průtok  $V [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$  a dopravní výšku  $H [\text{m vodního sloupce}]$ .

Objemový průtok stanovíme z hmotnostního průtoku:

$$\dot{m} = 0,06 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow V = \frac{0,06 \cdot 3600}{1000} = 0,216 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (47)$$

Výrobci čerpadel uvádějí dopravní tlak  $\Delta p_{\varepsilon}$  nebo dopravní výšku  $H [\text{m vodního sloupce}]$ . Přepočet dopravního tlaku na dopravní výšku:

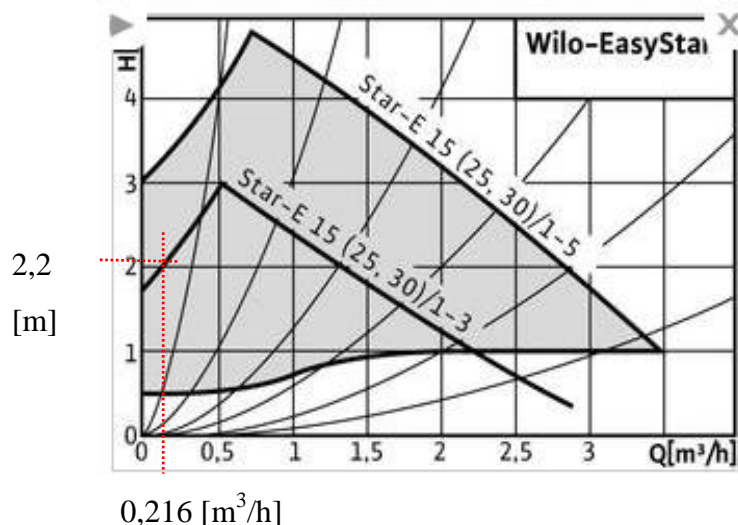
Pro zjednodušení můžeme uvažovat, že gravitační zrychlení  $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  viz rovnice xxx.

$$\begin{aligned} \Delta p_{\varepsilon} &= h \cdot \rho \cdot g \\ \Delta p_{\varepsilon} &= 1 \text{ m} \cdot 1000 \cdot 10 \\ 10 \text{ kPa} &= 1 \text{ m} \end{aligned} \quad (48)$$

$$\Delta p_{\varepsilon} = 21,821 \text{ kPa} \Rightarrow H \doteq 2,2 \text{ m}$$

Určení pracovního bodu čerpadla:

Obrázek 30 - Výkonový graf Wilo – EasyStar [20]



Volím oběhové čerpadlo WILO STAR-E 25/1-3 EASYSTAR.

Parametry:

Technická základní data :

přípustné teplotní rozmezí	+20 °C až +110 °C
síťová přípojka	1~230 V, 50 Hz
druh krytí	IP 42
jmenovitá světlost	Rp 1
max. provozní tlak	10 bar
přípojovací rozměr	6/4 "

Pro připojení oběhového čerpadla na otopnou soustavu je třeba použít redukci z 6/4 " na DN 15.



Obrázek 31 - Oběhové čerpadlo WILO STAR-E [20]

Rozdělení hmotnostního průtoku do jednotlivých větví – podle poměrů výkonů otopných těles.

$$\text{Pravá větev} \quad \sum Q_{OT,p} = 2985W \quad (49)$$

$$\text{Levá větev} \quad \sum Q_{OT,l} = 1187W \quad (50)$$

$$\text{Celkem} \quad \sum Q_{OT,c} = 2985 + 1187 = 4172W \quad (51)$$

$Q_{OT,c}$  celkový tepelný výkon všech otopných těles [W]

$Q_{OT,p}$  součet tepelných výkonů na pravé větvi [W]

$Q_{OT,I}$  součet tepelných výkonů na levé větvi [W]

Rozdělení hmotnostního průtoku:

Do pravé větve

$$\dot{m}_{PV} = \frac{Q_{OT,p} \cdot \dot{m}}{Q_{OT,c}} = \frac{2985 \cdot 0,06}{4172} = 0,0429 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 154,6 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (52)$$

$$\dot{m}_{LV} = \dot{m} - \dot{m}_{PV} = 0,06 - 0,0429 = 0,0171 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 61,56 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (53)$$

$\dot{m}$  celkový hmotnostní tok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\dot{m}_{PV}$  hmotnostní tok v pravé větvi [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\dot{m}_{LV}$  hmotnostní tok v levé větvi [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

## 11 Expanzní nádoba

Literatura: [16, 17, 18]

Expanzní nádoba je zařízení sloužící k vyrovnávání změn tlaku kapaliny (objemové roztažnosti), vlivem změny teploty kapaliny proudící v soustavě. Rozlišujeme otevřené a tlakové expanzní nádoby. Při ohřevu teplotněsensitive kapalina expanduje.

Otevřené expanzní nádoby:

Pokud je umístěná v nejvyšším bodě soustavy lze topnou soustavu zabezpečit, ale má však mnoho nevýhod. Kvůli otevřené hladině bude do soustavy neustále vnikat vzduch (což může mít za následek korozi těles v otopné soustavě), z toho důvodu bude potřeba častěji odvzdušňovat, musíme dbát na to, aby v zimě nezamrzla atd.

Uzavřené expanzní nádoby:

Udrží soustavu pod neustálým tlakem a zároveň vyrovnávají jeho výkyvy. Nádoba je oddělena speciální membránou kde na jedné straně působí rozpínající se kapalina a na druhé straně proti ní působí stlačený plyn, viz obrázek 32.





Obrázek 32 - řez membránovou tlakovou nádobou [16]

### 11.1 Návrh tlakové expanzní nádoby

Na svoji soustavu jsem se rozhodl použít tlakovou expanzní nádobu. Při návrhu jsem vycházel z normy ČSN 06 0830.

$$V_{et} = 1,3 \cdot V_0 \cdot n \cdot \frac{1}{\eta} = 1,3 \cdot 61 \cdot 0,02551 \cdot \frac{1}{0,6} = 3,37 \div 4l \quad (54)$$

$V_{et}$  objem expanzní tlakové nádoby [l]

$V_0$  objem vody v celé otopné soustavě [l]

$n$  součinitel zvětšení objemu [-], viz tabulka xxx

$\eta$  stupeň využití expanzní nádoby [-]

$$\eta = \frac{p_{h,dov,A} - p_{d,A}}{p_{h,dov,A}} = \frac{300 - 120}{300} = 0,60 \quad (55)$$

$p_{h,dov,A}$  nejvyšší dovolený absolutní tlak => otevírací absolutní tlak pojistného ventilu [kPa]

$p_{d,A}$  hydrostatický absolutní tlak [kPa]

Musíme dosazovat v absolutních tlacích, tj. přetlak + barometrický tlak, a nikoli v přetlacích. Zjednodušeně pak můžeme říct:

$$p_{d,A} = \rho \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3} + p_B = 1000 \cdot 10 \cdot 0,002 + 100 = 120 kPa \quad (56)$$

$\rho$  hustota vody = 1000 kg.m<sup>-3</sup>

- g      tíhové zrychlení =  $10\text{m.s}^{-2}$   
h      výška vodního sloupce nad expanzní nádobou [m]  
p<sub>B</sub>    barometrický tlak = 100 kPa

Tabulka 24 – určení  $n$  [17]

$\Delta t = t_{max} - 10$ [K]	20	30	40	45	50	55	60	65	70
$n$ [-]	0,00401	0,00749	0,01169	0,01413	0,01672	0,01949	0,02243	0,02551	0,02863
$\Delta t = t_{max} - 10$ [K]	75	80	85	90	95	100	105	110	115
$n$ [-]	0,03198	0,03553	0,03916	0,04313	0,04704	0,05112	0,05529	0,05991	0,06435

Výpočet objemu vody v soustavě  $V_0$ :

Objem potrubí:

$$V_p = \frac{l_c \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{44,35 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,015^2}{4} \cdot 1000 = 15,6l \quad (57)$$

$l_c$       celková délka potrubí [m]

$d$       vnitřní průměr potrubí [m]

Otopná tělesa:

$$V_{OT} = \sum V_i = 2 \cdot 4,32 + 2 \cdot 1,35 + 8,16 + 6,8 \cong 25l \quad (58)$$

$V_i$       objem jednotlivých otopných těles [l]

Objem kotle se přibližně rovná:

$$V_k = 20l \quad (\text{doporučená hodnota pro výpočet})$$

Potom celkový objem se rovná:

$$V_0 = V_p + V_{OT} + V_k = 15,6 + 25 + 20 \cong 61l \quad (59)$$

Určující hodnota při výběru expanzní nádoby je vypočítaný objem expanzní nádoby  $V_{et} = 4l$ . Zároveň musí splňovat nejvyšší dovolený absolutní tlak soustavy

$p_{h,dov,A} = 0,3 \text{ MPa}$ . Tato hodnota byla dle zkušeností navržena s ohledem na zabezpečující prvky v soustavě, trubky a jednotlivá tělesa soustavy.

Volím tlakovou expanzní nádobu typ DUKLA CZ B 08/3. [23]

Parametry:

Objem	8 l
Přetlak max.	0,3 MPa
Teplota max.	110 °C
Typ membrány	pryžová
Průměr	208 mm
Připojovací rozměr	G3/4"



Obrázek 33 - Expanzní nádoba DUKLA [18]

Pro připojení soustavě je potřeba použít redukci z 3/4" na DN 15. Schéma zapojení do otopné soustavy, viz příloha 2.

## 11 Kombinovaný zásobník tepla

Literatura: [19]

„Slouží pro příprava TUV, pro objekty s teplovodním ústředním vytápěním. Zásobník má zabudovaný elektrický dohřev, pro případ nedostatku výkonu zdroje nahřát větší objem kapaliny za kratší čas, nebo elektrický dohřev mimo topnou sezónu s využitím například nízkého tarifu elektrické energie (noční proud).“ [19]

Volba objemu:

Množství objemu vody v zásobníku volím 2 x 80 l, takže z objemů udávaných výrobcí je nejbližší vyšší 180 l.

Typ - DRAŽICE OKC 180/1m<sup>2</sup> (180 L, závěsný, svislý, výměník 1 m<sup>2</sup>)  
kombinovaný zásobník

Technické údaje:

- |                        |                  |
|------------------------|------------------|
| - Transportní hmotnost | 93 kg            |
| - Objem                | 180 l            |
| - Způsob ohřevu        | Kombinovaný      |
| - Doba ohřevu          | 26 min           |
| - Provedení            | Závěsný / svislý |
| - Ochranná anoda       | ano              |



Obrázek 33 -  
kombinovaný zásobník  
tepla Dražice, OKC [19]

Možnosti ohřevu:

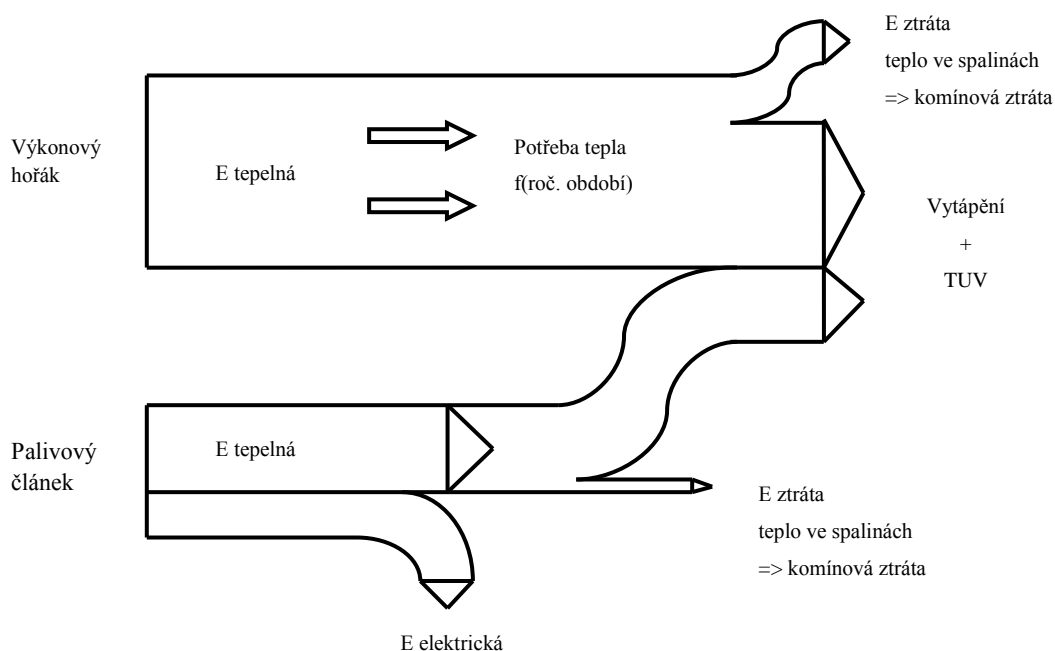
„Elektrickou energií. Keramické topné těleso ovládané provozním termostatem a jistěné bezpečnostním termostatem (tepelnou pojistkou). Teplotní rozsah 7 – 77 °C. Připojovací napětí 1-PE–N/AC 230 V/50 Hz. Elektrické krytí IP 45 umožňuje umístění ohřívače do zóny 1 dle ČSN 33 2000-7-701. Výměníkem. Ohřívač lze napojit na externí teplovodní zdroj s max. teplotou 110 °C a tlaku 1 MPa. Výměník pracuje v nuceném oběhu i v samotížném systému. Čidlo regulace topné vody lze vložit do společné jímky s čidly elektroinstalace.“ [19]

Kombinovaný zásobník bude zapojen do otopné soustavy podle schématu, viz příloha 2. Cirkulace vody bude zajištěna oběhovým čerpadlem stejných parametrů, jaké je u oběhu v otopné soustavě.

## 12 Provoz a začlenění palivového článku do energetické soustavy rodinného domu

Palivový článek byl navržen tak, aby pokryl průměrnou spotřebu elektřiny pro rodinný dům. Soustava ovšem musí být navržena tak, aby při překročení spotřeby  $1 \text{ kW}_{\text{el}}$  byla schopna dodat placenou elektřinu z veřejné sítě. Vznikající odpadní teplo při reakci lze dále využít pro vytápění. Palivový článek může dodat až  $2 \text{ kW}_t$  tepelné energie, což pokryje zhruba tak ze  $\frac{3}{4}$  tepelné ztráty dané budovy. Pro pokrytí celkové tepelné ztráty je potřeba využít přídatný plynový hořák, který je součástí palivového článku a může dodat až  $20 \text{ kW}_t$ . Na pokrytí tepelných ztrát a ohřev teplé užitkové vody jsem vypočetl, že bude stačit výkon  $12 \text{ kW}_t$ , takže palivový článek je pro tento typ budovy plně dostačující.

Toky energií soustavou jsou znázorněny na obrázku níže.



Obrázek 34 - Toky energií

V zimním období bude palivový článek plně využit na to, aby pokryl elektrickou a tepelnou potřebu domu. Naopak v letních dnech je potřeba převážně jen energie elektrické. Aby byl provoz palivového článku z ekonomického hlediska

výhodný, je dobré využít i odpadní teplo vznikající při chemické reakci. Část tepla můžeme využít na ohřev TUV a zbytek například na vytápění bazénu.

Je důležité si uvědomit, že s každou odstávkou palivového článku se zkracuje jeho životnost. Provoz palivového článku by měl probíhat kontinuálně (celoročně), samozřejmě s výjimkou odstávek kvůli údržbě, nebo pokud není budova v letních dnech delší dobu obývána.

Vysokoteplotní palivový článek jako zdroj energie se hodí převážně do takových typů staveb, které by měly trvalý odběr tepelné i elektrické energie.

## 13 Závěr

Pro zadaný rodinný dům byla vypočtena pomocí obálkové metody tepelná ztráta budovy. Výpočet byl navrhován pro nejhorší možnou variantu, tzn. tepelné ztráty v zimním období ( $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a bez tepelných zisků. Následně byl určen minimální výkon požadovaný po zdroji tepla, který vycházel z hmotnostního průtoku (potřeby dostat teplo o určitém výkonu do všech větví soustavy). Byla navržena dvoutrubková otopná soustava s teplotním spádem  $75/65\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nuceným oběhem. Do jednotlivých místností byly zvoleny deskové a trubkové otopné tělesa. Pro překonání tlakových ztrát bylo navrženo vhodné čerpadlo, aby zajistilo cirkulaci vody v otopné soustavě. Čerpadlo bude umístěné i na větví směřující do kombinovaného zásobníku pro ohřev TUV. Expanzní nádoba bude zajišťovat, že celá soustava bude pod stálým tlakem. Zdrojem tepla a elektrické energie pro rodinný dům je systém Sulzer Hexis typ Galileo 1000 N.

## 14 Seznam použité literatury

- [1] PETRÁŠ, D a kol.. *Vytápění rodinných a bytových domů*, Jaga group, s.r.o., Bratislava 2005, ISBN 80-8076-020-9
- [2] Szeliga Z.: *Základy technologie palivových článků*, VŠB-TUO, strava 2008, ISBN 978-80-248-1671-5
- [3] Szeliga Z.: *Základy technologie palivových článků*, VŠB-TUO, strava 2008, ISBN 978-80-248-1671-5 (podklady pro studium)
- [4] <http://www.tzb-info.cz>, (Postup výpočtu teplovodní dvoutrubkové otopné soustavy)
- [5] [http://www.enviros.cz/palivove\\_clanky/1\\_palivove\\_clanky](http://www.enviros.cz/palivove_clanky/1_palivove_clanky)
- [6] <http://voda.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1837> – (Vysokoteplotní palivové články, vhodná paliva a možnosti jejich využití (I,II,III))
- [7] <http://www.hexis.com>
- [8] <http://www.hytep.cz/?loc=article&id=3>
- [9] <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/3111.pdf> (zprava o rozvoji)
- [10] <http://www.heluz.cz/pdf/prirucka09/listy/family.pdf>
- [11] <http://www.anluxttw.cz/2-aktuality/2-dotace.html>
- [12] <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/reinberk/vypocty/dimtab.php4>
- [13] [http://www.korado.cz/cs/vyrobky/radik/prehled\\_modelu/radik\\_vk/](http://www.korado.cz/cs/vyrobky/radik/prehled_modelu/radik_vk/)
- [14] [http://www.korado.cz/cs/vyrobky/koralux/prehled\\_modelu/provedeni\\_linear/koralux\\_linear\\_plus](http://www.korado.cz/cs/vyrobky/koralux/prehled_modelu/provedeni_linear/koralux_linear_plus)
- [15] <http://www.cerpadla-shop.cz/obehova-cerpadla/obehove-cerpadlo-wilo-star-e-25-1-3-easystar-230v-roztec-180-mm-390.html>
- [16] <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5894>
- [17] <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1156>
- [18] <http://www.e-cerpadla.cz/expanzni-nadoby-dukla-cz-083-p-956.html>
- [19] <http://www.koupelny-sen.cz/drazice-okc-200>

### **Normy:**

- [19] ČSN 06 0210, Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění, Český normalizační institut 1993
- [20] ČSN 73 0540-3, tepelná ochrana budov Část 3: Výpočtové hodnoty veličin pro navrhování a ověřování, Český normalizační institut 1993

## **15 Seznam příloh**

- [1] Příloha 1 - Tabulky hodnot součinitelů místních ztrát
- [2] Příloha 2 - Schéma zapojení kotelny
- [3] Příloha 3 - Výkres zapojení otopné soustavy
- [4] Příloha 4 - Výkres půdorysu rodinného domu
- [5] Příloha 5 – Výkres řezu rodinného domu